

Stockage de l'énergie

Dans le contexte de ressources fossiles épuisables et la volonté de diminuer nos émissions de gaz à effet de serre avec le recours aux énergies renouvelables, le stockage de l'énergie devient un élément incontournable pour assurer la bonne gestion des ressources disponibles. Mais où faut-il stocker l'énergie ?

Sur un site isolé du réseau électrique, la nécessité du stockage de l'énergie s'impose si l'on veut pouvoir disposer d'électricité même si la production est nulle ; par exemple dans le cas d'une éolienne en l'absence de vent ou de panneau photovoltaïque la nuit.

Le stockage au niveau des sites de production, à partir des ressources renouvelables très fluctuantes (vent, soleil), permettrait une meilleure gestion du réseau. Au niveau des consommateurs raccordés au réseau, le stockage permettrait d'assurer la continuité en cas de coupure ainsi qu'un meilleur dimensionnement des installations.

Pour les applications embarquées (téléphonie...) le stockage de l'énergie est indispensable.

Pour les transports, l'hybridation permet de réduire significativement la consommation de carburant. Aussi est-il nécessaire d'avoir deux réservoirs : l'un alimentant le moteur thermique, l'autre alimentant le moteur électrique.

Mais s'il est aisé de remplir un réservoir d'essence ou une cuve domestique de fioul (permettant d'avoir des stocks d'énergie disponibles à la demande), pouvons-nous stocker l'électricité afin qu'elle soit disponible au moment où nous en avons besoin ? Existe-t-il des solutions de stockage techniquement viables ?

Oui, de nombreuses solutions existent. L'électricité ne se stocke pas directement, mais elle peut être convertie en d'autres formes qui sont stockables : il s'agit d'un stockage indirect. C'est un convertisseur électronique qui assurera la double conversion (une au stockage et une à la restitution).

Peut-on amortir économiquement de tels systèmes ? Oui ! De nombreuses réalisations existent, et les très bons rendements obtenus de nos jours avec les convertisseurs électroniques permettent de restituer presque intégralement l'énergie stockée. Ainsi la maturité de ces systèmes leur confère des coûts d'investissement et de fonctionnement toujours plus rentables.

Avant présentation de quelques moyens de stockage, nous verrons les grandeurs qui permettent de les caractériser. Ensuite une série d'exercices permettra d'aborder quelques problématiques des différents moyens de stockage : batteries, supercondensateurs, volants d'inertie...

1. Caractéristiques des moyens de stockage

Avant de présenter les différents moyens de stockage, nous allons définir leurs caractéristiques fondamentales.

Le dispositif de stockage étant destiné à fournir de l'énergie le moment venu, nous utiliserons dans toute la suite une convention de signes appelée « convention générateur ».

- La **capacité énergétique** W_{\max} : c'est l'énergie maximale stockable (en **J** ou en **W.h**)¹. Elle est supérieure à l'énergie réellement exploitable appelée **énergie utile** W_u . La capacité énergétique est une grandeur dimensionnante : le volume et le poids du réservoir augmentent lorsque W_{\max} augmente. On définit alors :
 - L'**énergie massique** qui est le rapport entre W_{\max} et la masse du système de stockage (en **W.h / kg**)
 - L'**énergie volumique** qui est le rapport entre W_{\max} et le volume du réservoir (en **W.h / m³**)Ces deux grandeurs sont primordiales dans les applications embarquées (systèmes portables, transport).
- L'**état de charge SOC** (State Of Charge) du dispositif de stockage est défini comme le rapport de l'énergie stockée sur la capacité énergétique : SOC (en **%**) = $W_{\text{stock}} / W_{\max}$.
- La **profondeur de décharge PDC** est donnée par PDC (en **%**) = $(W_{\max} - W_{\text{stock}}) / W_{\max} = 1 - SOC$
- P_{\max} (en **W**) est la **puissance maximale** pouvant être fournie ($P > 0$ en décharge) ou reçue ($P < 0$ en charge) par le moyen de stockage. La puissance est un débit d'énergie. Ainsi, à puissance P constante, échangée pendant une durée Δt , l'énergie stockée variera comme $\Delta W = - P \cdot \Delta t$ (ΔW en **J** avec P en **W** et Δt en **s** ou ΔW en **W.h** avec P en **W** et Δt en **h**)². De la même façon, on définit les puissances massique et volumique.
- La **constante de temps** $\tau = W_u / P_{\max}$ (en **s**, avec W_s en **J** et P_m en **W**) : c'est la grandeur qui caractérise le type de besoin auquel devra répondre le moyen de stockage :
 - τ petit (de qq secondes à qq minutes) conviendra à un besoin de puissance (une énergie convertie sur un temps bref, permettant par exemple d'accélérer un véhicule)
 - τ grand (de l'heure à qq jours) conviendra à un besoin d'autonomie (une énergie convertie sur un temps long, permettant par exemple d'effectuer un long trajet)
- Le rendement $\eta = W_u / W_f$ (en **%**) : c'est le rapport de l'énergie restituée W_u sur l'énergie fournie W_f .
- La **cyclabilité** est le nombre maximal N_{cycl} de charge \leftrightarrow décharge que peut effectuer le moyen de stockage. L'usure est liée à l'amplitude des cycles et à l'état de charge moyen.
- Le **coût** d'investissement et de fonctionnement (maintenance).
 - Il est indiqué en **€ / (kW.h)** pour les systèmes dimensionnés en énergie (τ grand)
 - Il est indiqué en **€ / kW** pour les systèmes dimensionnés en puissance (τ petit)
- La **sûreté** (polluant, nocif, explosif...)

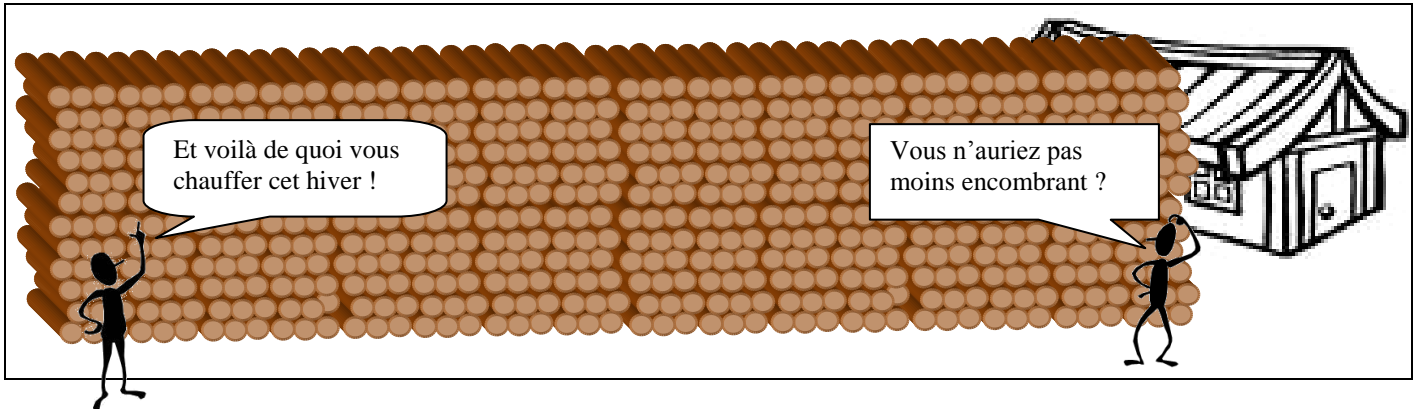
¹ On rappelle l'équivalence : **1 W.h = 3600 J**

² On rappelle **1 J = 1 W** pendant **1 seconde** **1W.h = 1 W** pendant **1 heure** = **10 W** pendant **6 minutes** ...

QCM

Parmi les affirmations suivantes cochez les réponses qui vous semblent correctes. Plusieurs choix sont possibles.

- Un système pouvant restituer 4 kW.h permet d'alimenter :
 10 ampoules 10 W pendant 20 h. **et** 3 chauffages 1000 W pendant 1 h. **et** 1 sèche linge 2000 W pendant 15 min **et**
 une table de cuisson 3000 W pendant 30 min **et** 1 ordinateur 200 W pendant 2 h 30 **et** 1 four 2000 W pendant 30 min
- Pour ce système de stockage :



- | | | | |
|-------------------------------------|--------------------------|---|--------------------------|
| L'énergie massique est trop grande | <input type="checkbox"/> | La capacité énergétique est trop élevée | <input type="checkbox"/> |
| L'énergie volumique est trop grande | <input type="checkbox"/> | L'énergie volumique est trop faible | <input type="checkbox"/> |

- Pour ce système de stockage :



- | | | | |
|-------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| L'énergie volumique est trop petite | <input type="checkbox"/> | L'énergie massique est trop grande | <input type="checkbox"/> |
| L'énergie volumique est trop grande | <input type="checkbox"/> | L'énergie massique est trop faible | <input type="checkbox"/> |

- Plus l'énergie massique est élevée, plus le réservoir est lourd
 Vrai Faux
- Plus l'énergie volumique est élevée, plus le réservoir est grand
 Vrai Faux
- Plus la puissance massique est grande, plus l'énergie massique est grande.
 Vrai Faux

2. Présentation et comparaison de différents moyens de stockage

Voici quelques moyens de stockage avec leurs spécificités (caractéristiques, utilisations, avantages, inconvénients, réalisations...)

- Les **batteries** : ce sont à elles que l'on pense immédiatement en matière de stockage. Les techniques sont nombreuses (Plomb-Acide, Nickel-Cadmium, Lithium...) et leur principale qualité est l'énergie massique élevée. L'inconvénient majeur est leur faible durée de vie (N_{cycl} de 100 à 1000) et la connaissance difficile de la quantité d'électricité stockée Q (en Ampère heure **A.h**) indiquant l'état de charge. L'énergie est stockée sous forme chimique et s'écrit W_{stock} (en **W.h**) = $Q.V$, où V (en volts **V**) est la tension aux bornes de la batterie. On les trouve dans les systèmes embarqués ou isolés ainsi que dans les fonctions de secours.
- Les **supercondensateurs** : c'est un nouveau procédé qui a permis d'atteindre des capacités de plusieurs centaines de Farads (on a pour les condensateurs usuels des capacités du picofarad (10^{-12}) à quelques milliers de microfarads (10^{-3})). L'énergie stockée sous forme électrostatique est W_{stock} (en **J**) = $\frac{1}{2} CV^2$ (C est la capacité du condensateur en Farad **F** et V la tension à ses bornes en **V**). Avec des puissances massiques élevées, on les retrouve beaucoup dans les applications embarquées.
- Les **inductances supraconductrices** (SMES : Superconductor Magnétic Energy Storage) : il s'agit de bobines à supraconducteurs (conducteurs de résistance nulle) permettant de faire circuler des courants très élevés (densité de courant > 300 A/mm²) pratiquement sans pertes. Ces bobines sont sans circuit magnétique. L'énergie, stockée sous forme magnétique dans l'air avoisinant la bobine, s'écrit W_{stock} (en **J**) = $\frac{1}{2} LI^2$ (L est l'inductance de la bobine en Henry **H** et I l'intensité du courant en Ampère **A**). Dimensionnées en puissance, elles nécessitent un lourd dispositif de refroidissement (-270 °C) assurant la supraconductivité. On en trouve connectées au réseau comme dispositifs de stabilisation et de qualité de l'énergie.
- Les accumulateurs à **volant d'inertie** (FES : Flywheel Energy Storage) : ils comprennent un cylindre massif appelé volant, associé à un moteur / générateur. L'énergie stockée sous la forme d'énergie cinétique est W_{stock} (en **J**) = $\frac{1}{2} J\Omega^2$ (le volant, dont l'inertie est J en **kg.m²**, tourne à la vitesse angulaire Ω en **rad / s**). Ils ont une grande cyclabilité (N_{cycl} de 10000 à 100000) et une constante de temps allant de la minute à l'heure.

Pour le stockage à grande échelle on peut citer entre autres:

- Le système **hydraulique gravitaire**, centrale de pompage \leftrightarrow turbinage déjà très répandu. L'énergie, stockée sous forme d'énergie potentielle, est W_{stock} (en **J**) = $\rho.V.g.h$ (ρ est la masse volumique de l'eau en **kg/m³**, V le volume d'eau en **m³**, g la constante de gravitation $g = 9.81$ **m.s⁻²** et h , en **m**, le dénivelé entre le bassin supérieur et le bassin inférieur).

Le diagramme de Ragone

Le diagramme de Ragone (*figure 1*) permet de comparer différents moyens de stockage. On porte en abscisse l'énergie massique et en ordonnée la puissance massique, deux grandeurs prépondérantes en matière de stockage embarqué. Nous nous intéressons ici à une automobile dont il faut assurer le déplacement.

1. Quelle est actuellement la source d'énergie communément utilisée pour propulser les véhicules ? Justifiez ce choix à partir du diagramme de Ragone.

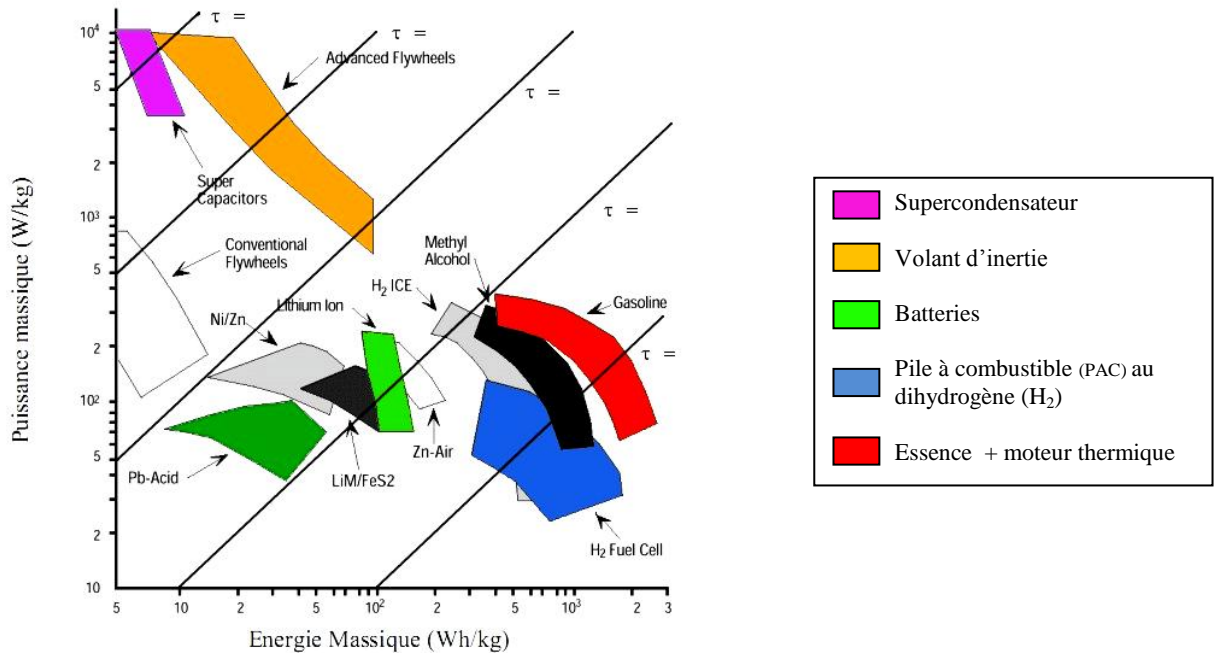


Figure 1.

Les transports routiers sont caractérisés par de longues distances parcourues à vitesse régulière.

2. Cela correspond-il à des appels de puissance ou à un besoin d'autonomie ?

On estime à 20 kW.h l'énergie nécessaire à l'autonomie d'un véhicule type Peugeot 106 à 110 km/h sur route plate, par vent nul pendant 1 heure. Calculez, pour assurer cette autonomie :

3. la masse d'un pack de supercondensateurs (on donne $W_{massique} = 6 \text{ Wh / kg}$) $M_{sc} =$
4. la masse d'une batterie Li-Ion (on donne $W_{massique} = 150 \text{ W.h / kg}$) $M_{batt} =$
5. la masse de carburant SansPb98 (on donne $W_{massique} = 12.3 \text{ kW.h / kg}$) $M_{SPb} =$
6. La masse de dihydrogène alimentant une pile à combustible (Fuel Cell en anglais).
On donne l'énergie massique du dihydrogène (H_2) : 40 kW.h/kg. $M_{H2} =$
7. Reprenez le calcul en considérant l'énergie massique (1.5 kW.h / kg) du dihydrogène incluant le poids du réservoir permettant de maintenir le gaz sous pression (350 bar) $M_{total} =$

Les batteries nécessitent une masse embarquée importante et imposent une recharge lente. Les batteries associées à une motorisation électrique ont néanmoins l'avantage de pouvoir récupérer l'énergie lors du freinage pour se recharger.

Pour la pile à combustible, le transfert d'énergie est accompagné d'émission d'eau et la masse nécessaire est 10 fois moindre, mais il n'existe pas à l'heure actuelle un réseau de dihydrogène assurant la possibilité de recharger facilement.

L'essence assure le meilleur compromis masse embarquée / autonomie. De plus le remplissage du réservoir ne prend que quelques minutes. Cependant la combustion du carburant est accompagnée de rejet de CO_2 .

Vu les calculs précédents, les supercondensateurs ne semblent pas convenir pour réaliser un réservoir d'énergie. Sur le diagramme de Ragone, figurent des droites sur lesquelles la constante de temps (définissant l'usage des moyens de stockage) est identique en tout point.

8. Calculez pour chacune des droites la constante de temps τ , définie par le rapport $W_{massique} / P_{massique}$.
9. Déterminez à partir de la valeur de τ , pour les moyens de stockage suivants, l'usage qu'il convient d'en faire

Supercondensateur	Volant d'inertie	Batteries
Pile à combustible (PAC) au dihydrogène (H ₂)		Essence

L'hybridation des véhicules (machine thermique en cycle routier et machine électrique en cycle urbain) permet d'utiliser le moteur thermique au mieux de ses performances (c'est-à-dire avec le meilleur rendement) et ainsi tirer le meilleur parti de l'énergie embarquée, réduisant la consommation d'essence et les émissions de CO₂.

Les transports en ville sont caractérisés par des démarrages et des arrêts fréquents.

10. Cela correspond-il à des appels de puissance ou à un besoin d'autonomie ?

On estime à 30 kW le besoin en puissance lors d'une phase d'accélération.

11. Calculez la masse d'une batterie Li-Ion (100 W / kg) permettant de cette puissance. $M_{bat} =$

On associe à la batterie, dimensionnée en énergie, des moyens dimensionnés en puissance. Ainsi, on diminue la masse des éléments de stockage nécessaires au fonctionnement du moteur électrique. Cela permet également d'alléger les appels de puissance sur la batterie et ainsi d'allonger sa durée de vie.

12. Citez deux moyens de stockage dimensionnés en puissance.

Les volants d'inertie ne sont pas utilisés pour les véhicules routiers car l'effet gyroscopique (dû à la rotation du volant d'inertie) perturbe la conduite. On en trouve cependant dans certains transports guidés (train, tramway).



Châssis du petit tramway de Bristol fonctionnant sans caténaire

13. Calculez la masse d'un pack de supercondensateurs (3000 W / kg) permettant de fournir une puissance de 30 kW lors d'une phase d'accélération. $M_{sc} =$
14. Quelle est alors la masse de l'ensemble {batterie + supercondensateurs} assurant respectivement le besoin en autonomie et celui d'appel de puissance ?

Nous allons à présent étudier en détails, le dimensionnement, le fonctionnement ainsi que d'autres aspects des différents moyens de stockages présentés précédemment.



Batterie Pb 12V 50 Ah

Les batteries

Le constructeur porte deux indications sur la batterie : la tension à vide et la capacité nominale.

La capacité nominale Q_n d'une batterie est la quantité maximale d'électricité que celle-ci peut stocker. L'unité est le coulomb (C) : c'est le produit du courant de charge (en A) par le temps de charge (en s) permettant d'obtenir la charge complète à partir d'une batterie vidée. Cette définition est également valable pour la décharge à partir d'une batterie pleine. L'unité usuelle est l'Ampère.heure (A.h) : $1 \text{ A.h} = 1 \text{ A} \cdot 3600 \text{ s} = 3600 \text{ C}$.

Ainsi une batterie de 50 A.h qui débite 10 A dans une charge, peut alimenter celle-ci pendant 5 heures.

L'intensité du courant étant défini comme un débit de charge électrique ($I = \frac{Q}{t}$), l'unité du courant de charge ou du courant débité par la batterie est usuellement exprimée en fraction de la capacité.

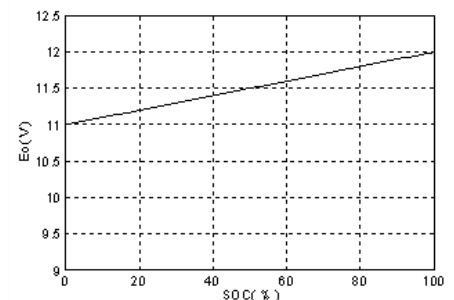
Ainsi pour une batterie de capacité 50 A.h qui débite 10 A, on dit que le courant de décharge est de $Q_n / 5$. Le dénominateur est donc naturellement le temps (en heure) pendant lequel ce courant peut être maintenu.

1. Complétez les propositions suivantes :

- Une batterie de 50 A.h peut débiter un courant de 5 A pendant La décharge se fait alors à Q_n / \dots
- Une batterie pouvant débiter un courant de 20 A pendant 10 h a une capacité nominale de ...
- Une batterie de 60 A.h, vide et rechargée à $Q_n / 20$ sera totalement rechargé en ...
Le courant de charge sera alors de A
- Si le courant maximal de charge est $2Q_n$, alors la batterie peut être rechargée en ...

Dans toute la suite de l'exercice on étudiera une batterie 12 V ; 20 A.h

- Calculez la capacité énergétique $W_{\max} = Q_n \cdot V$ de la batterie.
- On met expérimentalement en évidence que la tension à vide E_0 dépend de l'état de charge de la batterie. Les mesures sont portées sur le graphique ci-contre. Indiquez la relation entre la tension à vide E_0 et l'état de charge SOC.



La batterie possède une résistance interne r de 5 m Ω .

On utilise le modèle de Thévenin équivalent (MET) en convention générateur.

- Exprimez la tension V aux bornes de la batterie en fonction de la tension à vide E_0 , r et I .
- Exprimez alors la tension V en fonction de r , I et de l'état de charge SOC.
- Calculez V dans les cas suivants (l'intensité I est positive en décharge et négative en charge) :

	SOC = 55 %	SOC = 60 %	SOC = 65 %
$I = + 60 \text{ A}$		$V =$	$V =$
$I = + 10 \text{ A}$	$V =$	$V =$	
$I = 0 \text{ A}$	$V =$	$V =$	$V =$
$I = - 10 \text{ A}$	$V =$	$V =$	
$I = - 30 \text{ A}$		$V =$	$V =$

Les supercondensateurs (SC)



On cherche ici à dimensionner un pack (un groupement) de supercondensateurs pouvant fournir une puissance constante de 7.2 kW pendant 9 secondes.

1. Déterminez l'énergie maximale W_{max} que le pack doit pouvoir stocker.

$W_{max} =$

La tension maximale admissible aux bornes du pack est $V_{max} = 24 \text{ V}$.

2. Déterminez alors la valeur de la capacité C du pack de supercondensateurs.

$C =$

Un cahier des charges impose la tension minimale aux bornes du pack $V_{min} = 12 \text{ V}$.

3. Calculez l'énergie minimale W_{min} restant ainsi stockée dans le pack (et donc, pas utilisable). $W_{min} =$

4. Déduisez-en l'énergie réellement utilisable W_u .

$W_u =$

5. Calculez la profondeur maximale de décharge que fixe le cahier des charges.

$PDC_{max} =$

En divisant par deux la tension aux bornes du condensateur, on peut ainsi extraire 75 % de l'énergie stockée.

6. Chargé sous $V_{max} = 24\text{V}$, calculez la durée pendant laquelle le pack pourra fournir une puissance de 7.2 kW. $\Delta t =$
la puissance maximale extractible du pack durant 9 secondes. $P_{max} =$

Pour la suite, on donne la capacité du pack $C = 250 \text{ F}$.

Le pack de supercondensateurs est connecté à la charge à l'aide d'un convertisseur de puissance (figure 3). Le convertisseur permet de régler le transfert de puissance entre le pack et la charge en imposant la valeur de l'intensité I du courant.

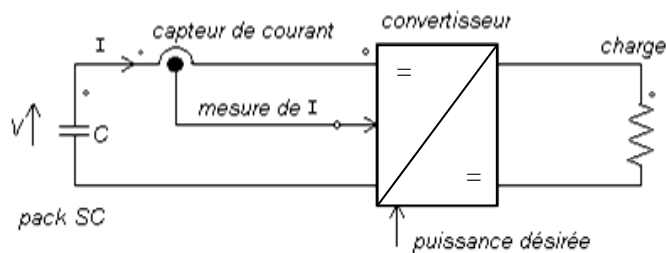


Figure 3.

La puissance instantanée échangée entre le pack et la charge est $p(t) = v(t).i(t)$ avec p en W, v en V et i en A.

7. Dans la convention choisie pour le pack de supercondensateurs, quelle est la signification du signe de $p(t)$?

8. Déterminez l'intensité I du courant pour que le pack **fournisse** une puissance de 5.4 kW pour différentes valeurs de la tension V aux bornes du pack :

Puissance fournie de 5.4 kW	$V = 24 \text{ V}$	$V = 18 \text{ V}$	$V = 14 \text{ V}$
	$I =$	$I =$	$I =$

9. Déterminez l'intensité I du courant pour que le pack **reçoive** une puissance de 900 W pour différentes valeurs de la tension V aux bornes du pack :

Puissance reçue de 900 W	$V = 12 \text{ V}$	$V = 18 \text{ V}$	$V = 22 \text{ V}$
	$I =$	$I =$	$I =$

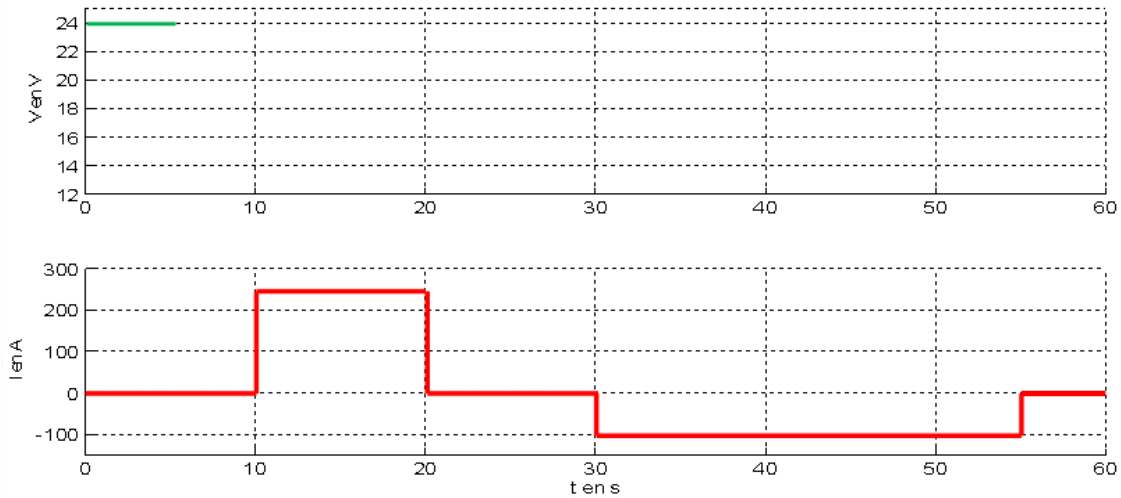
Dans la suite de l'exercice, le convertisseur réglera des échelons de courant ($I = \text{constant}$).

10. La puissance échangée entre le pack et la charge sera-t-elle constante dans ces conditions ?

11. A partir de la puissance désirée, indiquez sur le graphique de la page suivante, sous les deux échelons de courant ($10s < t < 20 \text{ s}$ et $30s < t < 55 \text{ s}$), si le pack se charge ou se décharge.

Lorsque le courant est constant, la variation de la tension aux bornes du pack est : $\frac{\Delta v}{\Delta t} = -\frac{I}{C}$

12. Tracez alors l'évolution de la tension $v(t)$ aux bornes du pack.



13. Calculez $W_{\text{stock}}(t = 0s)$, $W_{\text{stock}}(t = 25s)$ puis l'énergie W_f fournie par le pack sur cet intervalle

$$W_{\text{stock}}(0) = \quad \quad \quad W_{\text{stock}}(25) = \quad \quad \quad W_f =$$

14. Calculez $W_{\text{stock}}(t = 60s)$ puis l'énergie W_R reçue par le pack sur l'intervalle $[30s ; 55s]$.

$$W_{\text{stock}}(60) = \quad \quad \quad W_R =$$

15. Calculez l'état de charge à la fin de chaque échelon. $\text{SOC}(25s) =$ $\text{SOC}(60s) =$

La résistance série r du pack, traversée par le courant I , est de $5 \text{ m}\Omega$. Dans ces conditions :

16. Calculez, lors de la décharge, les pertes joules puis l'énergie perdue. $P_{Jd} =$ $W_{Jd} =$

17. Déduisez-en l'énergie W_{ud} exploitable par le convertisseur lors du cycle de décharge. $W_{ud} =$

18. Calculez, lors de la charge, les pertes joules puis l'énergie perdue. $P_{Jc} =$ $W_{Jc} =$

19. Déduisez-en l'énergie W_{fc} fournie par le convertisseur lors du cycle de charge. $W_{fc} =$

20. Exprimez et calculez les rendements du pack lors des cycles de décharge et de charge.

$$\eta_d = \frac{\quad}{\quad} = \quad \quad \quad \eta_c = \frac{\quad}{\quad} =$$

21. Le convertisseur ayant un rendement η de 95 % (en charge et en décharge), recalculez les rendements globaux (pack+convertisseur) en décharge puis en charge. $\eta_{gd} =$ $\eta_{gc} =$

Pour réaliser le pack de capacité $C = 250 \text{ F}$, vous disposez de deux types de supercondensateur (voir ci-dessous) en nombre illimité. Vous n'associez que des supercondensateurs de même type.



$$C_1 = 2500 \text{ F} / V_{\text{max}} = 2.5 \text{ V} / I_{\text{moy}} = 125 \text{ A}$$



$$C_2 = 650 \text{ F} / V_{\text{max}} = 2.7 \text{ V} / I_{\text{moy}} = 63 \text{ A}$$

La tension admissible aux bornes d'un élément est très inférieure aux 24V.

22. Comment associer les condensateurs pour augmenter la tension admissible ? Combien en faudra-t-il ?

23. Quelle sera alors la capacité équivalente ? Cette association permet-elle d'atteindre la capacité désirée ?

24. Sinon, quelle association permet d'augmenter la capacité équivalente ?

25. Le courant moyen du pack est-il compatible avec les valeurs des échelons du graphique ? Sinon réessayez.

Les volants d'inertie

L'énergie cinétique W_c (en **J**) d'un corps de masse m (en **kg**), animé d'une vitesse v (en **m/s**) est $W_c = \frac{1}{2} m v^2$.

1. Calculez, (en **J** puis en **W.h**), l'énergie cinétique d'un poids lourd de 15 t roulant à 80 km/h.

Une masse ponctuelle suit un mouvement circulaire de rayon R (en **m**) à une vitesse angulaire Ω (en **rad/s**)

2. Exprimez la vitesse linéaire v (en **m/s**) de la masse en fonction de R et Ω .

$v =$

3. Exprimez alors W_c en fonction de m , R et Ω .

$W_c =$

Pour une masse, d'inertie J (en **kg.m²**), en rotation autour d'un axe à la vitesse angulaire Ω (en **rad/s**), on donne l'expression de l'énergie cinétique (en joules **J**) $W_c = \frac{1}{2} J \Omega^2$.

4. A l'aide de l'expression que vous venez d'établir, exprimez l'inertie J en fonction de m et de R . $J =$

L'inertie, notée J , nous indique si l'accélération, le freinage ou le changement de direction d'un solide nécessite un effort important (J élevé) ou modéré (J faible).

L'inertie J d'un solide dépend de sa masse mais aussi de la répartition de celle-ci par rapport à l'axe de rotation.

Pour exemple, prenez un marteau, tête en main, et faites-le pivoter. Recommencez l'expérience en prenant le marteau par le manche...

A. Capacité énergétique d'un volant

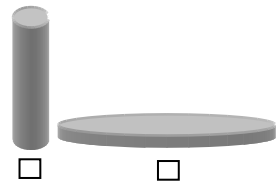
Afin d'obtenir un système de stockage d'énergie, on réalise un volant en forme de cylindre plein à partir d'une masse M d'un acier haute résistance.

L'inertie J (en **kg.m²**) d'un cylindre plein de rayon R (en **m**), de hauteur h et de masse M (en **kg**) est $J = \frac{1}{2} MR^2$.

On cherche à maximiser l'énergie cinétique stockée $W_c = \frac{1}{2} J \Omega^2$.

1. Si le rayon R du cylindre est multiplié par 2, dans quelle proportion varie son inertie J ?

2. Quel profil privilégier pour augmenter l'inertie (et donc à Ω donnée, augmenter l'énergie W_c) ?



Chaque partie du cylindre tourne à la même vitesse angulaire Ω . Cependant les parties les plus éloignées du centre ont une vitesse tangentielle plus élevée que les parties centrales. Les parties périphériques du cylindre, allant à une vitesse plus élevée, sont soumises à des efforts mécaniques plus importants. Chaque matériau est alors caractérisé par une vitesse limite V_{plim} au-delà de laquelle le cylindre subirait des déformations irréversibles pouvant mener à la destruction du volant.

3. Exprimez Ω_{lim} , la vitesse angulaire limite, en fonction de V_{plim} et de R .

$\Omega_{lim} =$

Si l'inertie J peut être augmentée en jouant sur le profil du cylindre, la vitesse angulaire ne peut être augmentée indéfiniment, fixant ainsi une énergie stockée limite $W_{c_{lim}} = \frac{1}{2} J \Omega_{lim}^2$.

4. Quand le rayon est multiplié par 2, dans quelle proportion varient :

- L'inertie J du cylindre ? La vitesse angulaire limite Ω_{lim} ?
- L'énergie stockée limite $W_{c_{lim}}$?

5. Quand le rayon est divisé par 2, dans quelle proportion varient :

- L'inertie J du cylindre ? La vitesse angulaire limite Ω_{lim} ?
- L'énergie stockée limite $W_{c_{lim}}$?

6. Exprimez $W_{c_{lim}}$ en fonction de M et V_{plim} . Concluez sur le choix du profil maximisant l'énergie stockée.

L'expression précédente montre que l'énergie limite que peut stocker un volant, dépend du matériau utilisé (définissant V_{plim}) et de sa masse M mais pas du profil du cylindre. On définira donc, pour chaque matériau, une **énergie massique** et/ou une **énergie volumique** dans les **conditions limites** d'utilisation.

On a $W_{c\ lim} = \frac{1}{4}M \cdot V_p^2\ lim = \frac{1}{4}\rho\mathcal{V} \cdot V_p^2\ lim$ où \mathcal{V} est le volume du cylindre en m^3 .

Pour un cylindre plein d'acier haute résistance (35NiCrMo16), la vitesse périphérique limite est $V_{plim} = 520$ m/s. La masse volumique de cet acier est $\rho = 7800$ kg / m^3 .

7. Calculez l'**énergie volumique limite** d'un volant d'un tel acier : $\left(\frac{W_c}{\mathcal{V}}\right)_{lim} = \frac{1}{4}\rho \cdot V_p^2\ lim =$ J / m^3
 $=$ W.h/ litre

Afin de s'assurer que le volant fonctionne hors de la zone de rupture, on fixe, pour la vitesse maximale, la marge de sécurité suivante $V_{p\ max} = V_{p\ lim} / \sqrt{2}$

8. Exprimez l'**énergie volumique maximale** en fonction de l'énergie volumique limite. Calculez-la.

$$\left(\frac{W_c}{\mathcal{V}}\right)_{max} = \frac{1}{4}\rho \cdot V_p^2\ max =$$

B. Dimensionnement de l'ensemble Volant – Machine – Convertisseur

L'énergie cinétique stockée par le volant sera prélevée et restituée à un réseau électrique. Ainsi, le volant est solidaire d'une machine électrique pilotée par un convertisseur d'électronique de puissance.

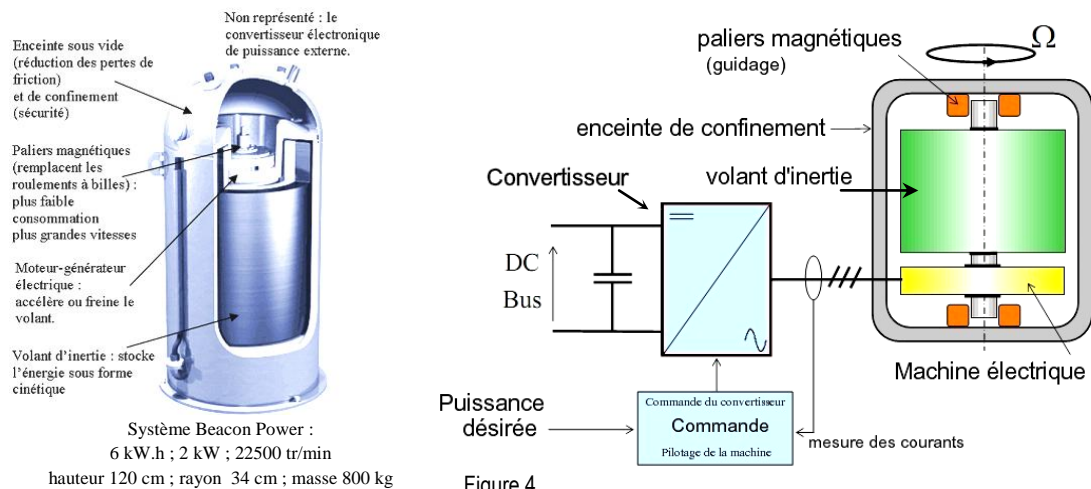


Figure 4.

En **charge**, le convertisseur pilote la machine électrique de sorte qu'elle fonctionne en **moteur**, le volant est **accélééré**, il emmagasine donc de l'énergie.

En **décharge**, le convertisseur pilote la machine électrique de sorte qu'elle fonctionne en **générateur**, le volant est **freiné**, l'énergie est restituée au réseau électrique.

On dimensionne l'ensemble comme suit :

- Le volume du volant détermine (pour un matériau donné) la capacité énergétique $W_{c\ max}$ (cf. partie 2).
- On choisira la constante de temps τ , en fonction du type de besoin : τ petit pour des appels répétés de puissance, τ grand pour assurer l'autonomie. On donne $\tau = W_{c\ max} / P_{max}$ (τ en s, W en J et P en W).
- La taille du convertisseur électronique augmente avec la puissance maximale P_{max} qui y transite.
- Le rayon R du volant fixe la vitesse de rotation maximale Ω_{max} (cf. partie 2).
- Enfin, la taille de la machine augmente avec le couple C (en N.m) $= P_{max} / \Omega_{max}$.

On cherche ici à dimensionner un volant en acier haute résistance (35NiCrMo16) ayant une capacité énergétique $W_{c_{max}} = 1 \text{ kW.h}$. On donne pour ce matériau l'énergie volumique maximale : 75 Wh / litre .

1. Déterminez le volume \mathcal{V} du volant cylindrique ayant la capacité énergétique désirée. $\mathcal{V} =$ litres = m^3

A partir d'une même énergie stockée, on veut dimensionner un système en énergie et l'autre en puissance. On donne $\tau_1 = 1 \text{ min}$ et $\tau_2 = 1 \text{ h}$.

2. Indiquez le numéro du système dimensionné en énergie, et de celui dimensionné en puissance.

3. Calculez dans chaque cas la puissance maximale que doit pouvoir délivrer le convertisseur.

$$P_{1_{max}} = \quad \quad \quad P_{2_{max}} =$$

4. Calculez pour les rayons $R_1 = 5 \text{ cm}$ et $R_2 = 15 \text{ cm}$, la hauteur de cylindre correspondante. $h_1 =$ $h_2 =$

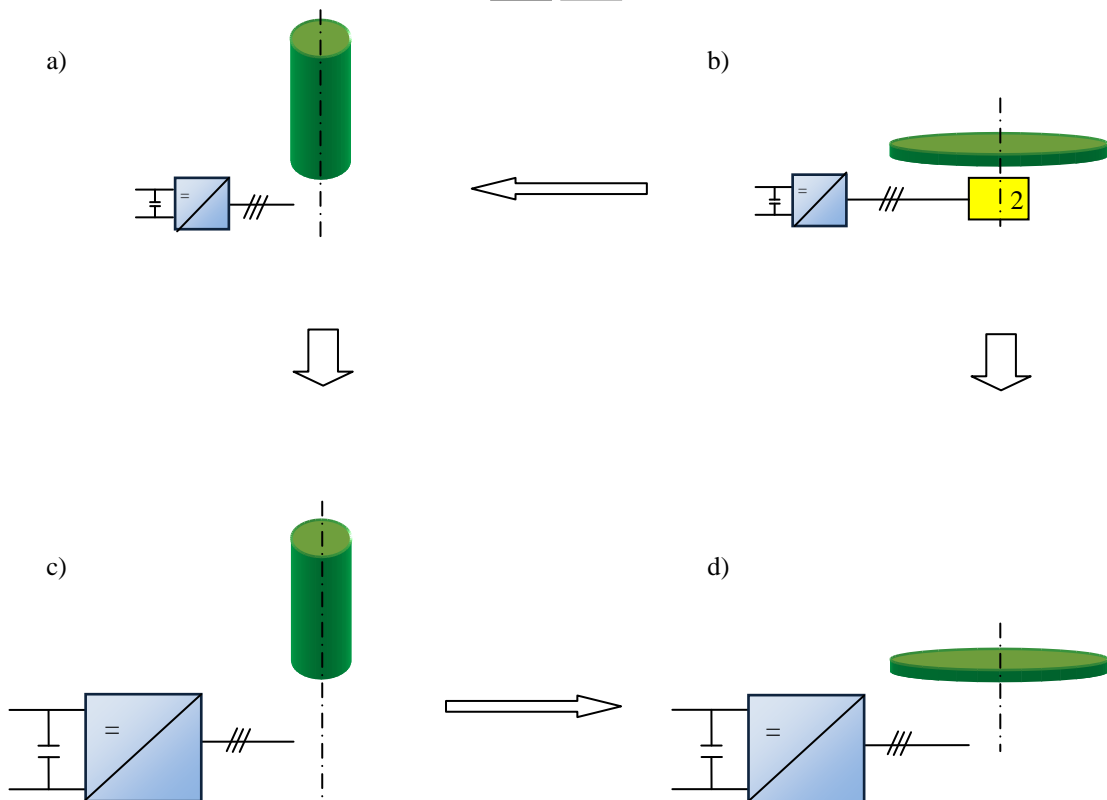
On donne la vitesse tangentielle maximale pour ce matériau : $V_{p_{max}} = 360 \text{ m / s}$.

5. Calculez pour les rayons R_1 et R_2 de cylindre la vitesse angulaire maximale associée.

$$\Omega_{1_{max}} = \quad \text{rad/s} = \quad \quad \text{tr / min} ; \quad \quad \quad \Omega_{2_{max}} = \quad \text{rad/s} = \quad \quad \text{tr / min}$$

6. En procédant comme ci-dessous, déterminez, pour chaque transition, les variations (\nearrow , \searrow ou $=$) des grandeurs indiquées.

- En observant le convertisseur, on déduit la variation P_{max} et donc celle de τ .
- En observant le volant, on voit la variation de R , on en déduit alors celle de Ω_{max} .
- Des deux variations précédentes, on déduit la variation de $C = P_{max} / \Omega_{max}$, ce qui permet de choisir la taille de la machine parmi les suivantes :



6. Déterminez alors, parmi ces figures, quelles sont celles qui peuvent correspondre aux systèmes 1 et 2.

C. Etude d'un cycle charge - décharge

Une des caractéristique de la machine est la plage $[\Omega_{min} ; \Omega_{max}]$ sur laquelle celle-ci peut travailler à puissance maximale.

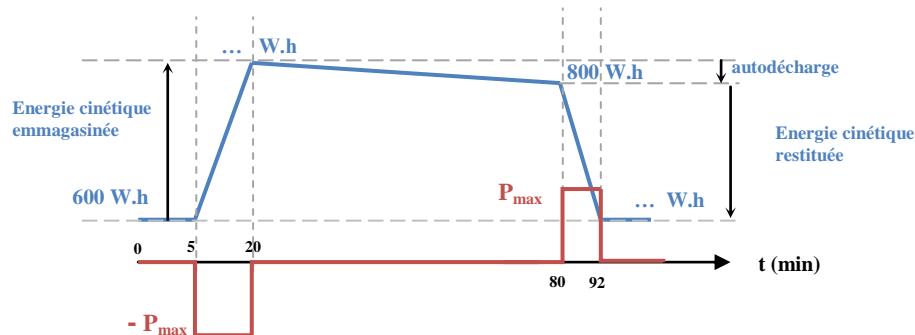
1. Exprimez la profondeur de décharge du volant d'inertie en fonction de $r = \Omega_{max} / \Omega_{min}$. $PDC = \frac{W_{Cmax} - W_{Cmin}}{W_{Cmax}} =$
2. Calculez pour $r = \Omega_{max} / \Omega_{min} = 2$ $PDC =$
et pour $r = \Omega_{max} / \Omega_{min} = 3$ $PDC =$

Le système est dimensionné comme suit : $W_{max} = 1 \text{ kW.h}$ et $\tau = 1 \text{ h}$.

3. Calculez la puissance maximale. $P_{max} =$

On étudie un cycle de charge - décharge se faisant à puissance maximale P_{max} .

Avec la convention générateur, on a $\Delta W = - P \cdot \Delta t$ (ΔW en **W.h** avec P en **W** et Δt en **h**)



- Calculez ΔW_{ce} , l'énergie cinétique emmagasinée et déduisez-en l'énergie stockée à l'instant $t = 20 \text{ min}$.
 $\Delta W_{ce} =$ $W_c(20) =$
- 4. Calculez ΔW_{cr} , l'énergie cinétique restituée et déduisez-en l'énergie stockée par à l'instant $t = 92 \text{ min}$.
 $\Delta W_{cr} =$ $W_c(92) =$

Le phénomène d'autodécharge (ralentissement du volant à causes des frottements) ne permet pas de restituer intégralement l'énergie cinétique emmagasinée.

5. Exprimez puis calculez le rendement η_V du volant sur ce cycle : $\eta_V = \frac{\Delta W_{cr}}{\Delta W_{ce}} =$
6. Calculez en **% / heures** les pertes d'autodécharge.
7. Comment doit-être l'inertie du cylindre (faible ou élevée) pour minimiser ce phénomène ?

Afin de réduire les pertes d'autodécharge, on diminue les frottements grâce à un guidage par suspension magnétique et l'enceinte de confinement du volant est sous vide pour limiter les frottements de l'air.

On cherche enfin à calculer le rendement du système volant – machine – convertisseur.

L'ensemble machine-convertisseur a un rendement $\eta_{m-c} = 90 \%$ en charge ainsi qu'en décharge.

8. Sur le cycle charge – décharge étudié, exprimez en fonction de η_{m-c} et de η_V , le rendement η du système.

$$\eta =$$

10. Calculez le rendement η .

Bibliographie

B. MULTON et J. RUER, « [Stocker l'électricité : oui, c'est indispensable et c'est possible. Pourquoi, où, comment ?](#) », Publication ECRIN en contribution au débat national sur l'énergie, avril 2003, téléchargeable : <http://www.ecrin.asso.fr/energies/>

B. MULTON, H. BEN AHMED, « [Le stockage stationnaire d'énergie électrique : pourquoi et comment ?](#) », Revue 3E.I, n°48, mars 2007, pp. 6-16.

H. BEN AHMED, B. MULTON, N. BERNARD, C. KERZREHO, « [Le stockage inertiel électromécanique](#) », Revue 3E.I, n°48, mars 2007, pp. 18-29.

H. DISCOURS, « Motorisation d'un véhicule hybride », Revue 3E.I, n°44, mars 2006, pp 56-67.

Pré requis

Après l'introduction de quelques caractéristiques des moyens de stockage, le document présente une suite d'exercices indépendants. Ils constituent néanmoins une progression et sont de difficulté croissante. Ci-dessous les pré-requis pour les aborder :

- **QCM** : notions présentées dans la partie 1. *Caractéristiques des moyens de stockage*
- **Diagramme de Ragone** : notions d'énergie et de puissance massiques de la partie 1. *Caractéristiques ...*
- **Batteries** : Expression de la tension aux bornes d'un MET
- **Supercondensateurs** : notions de rendement et profondeur de décharge présentées dans la partie 1. et expression de l'énergie stockée dans un condensateur présentée dans la partie 2. *Présentation ...*
- **Volants d'inertie** : à peu près toutes les notions présentées dans la partie 1. *Caractéristiques...*