

Solutions de stockage de l'énergie pour les systèmes de production intermittente d'électricité renouvelable

Gaël ROBIN,
Marie RUELLAN,
Bernard MULTON,
Hamid BEN AHMED,
Pierre-Yves GLORENNEC



- ✓ Eolien offshore (Europe) :
 - ✓ 540 MW installés fin 2003
 - ✓ + de 60 GW en projet
 - ✓ Potentiel estimé : **3000 TWh/an**
 - ✓ Potentiel « vraisemblable » (20 à 30 ans) : **315 TWh/an**
 - ✓ Consommation européenne en 2020 : **4300 TWh/an**



✓ Production marine mondiale (houle, courants marins)

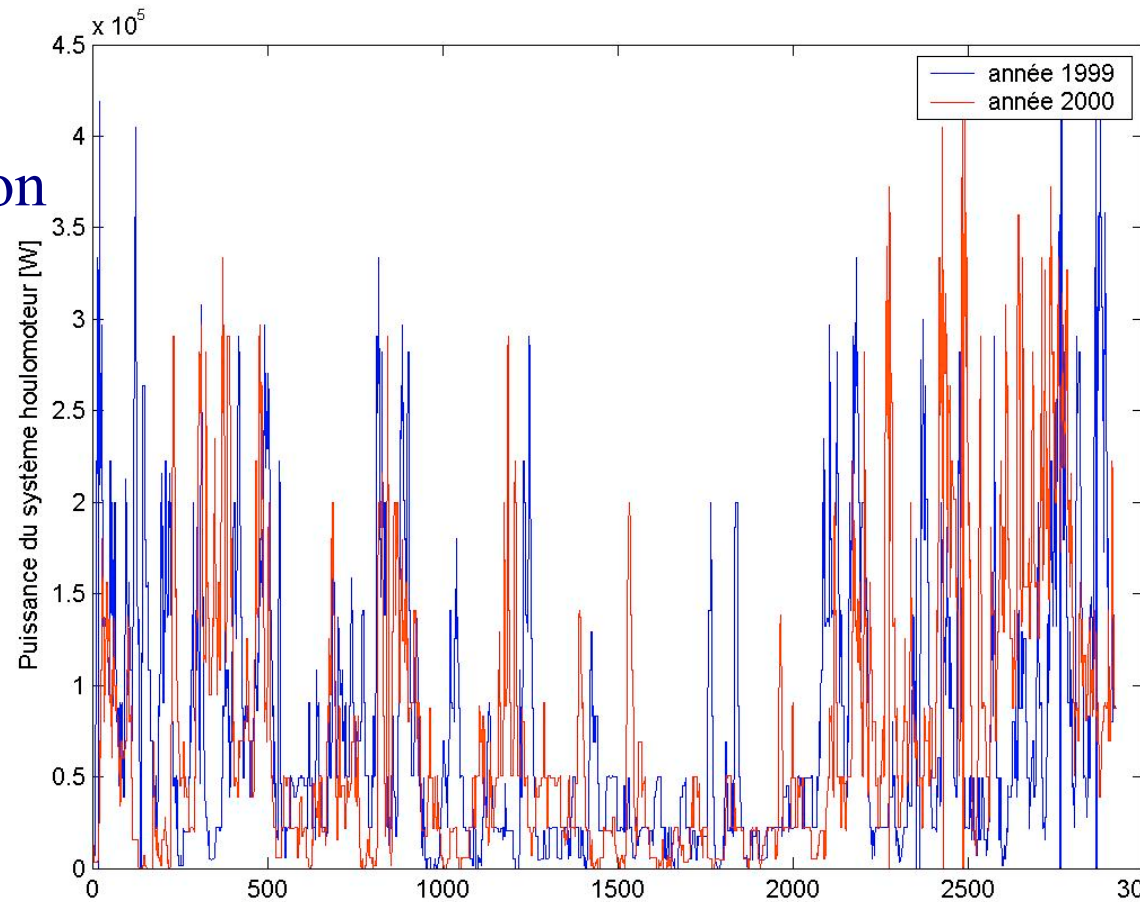
EREC 2040

✓ 230 TWh/an (scénario optimiste)

✓ 100 TWh/an (scénario pessimiste)

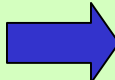
✓ Ressources intermittentes

→ fluctuation de la production



Pourquoi stocker ?

- Augmenter la pénétration des sources intermittentes éoliennes, photovoltaïques, houlomotrices...
- Réduire les besoins en centrales thermiques d'appoint

 **Développement durable (\rightarrow CO₂, indépendance énergétique...)**

- Améliorer et sécuriser la gestion du réseau
- Permettre l'îlotage de consommateurs/producteurs

 **Alimentation en électricité plus sûre et plus robuste**

Stockage d'électricité - principales caractéristiques

- ✓ Des besoins variés :
 - ✓ Applications **stationnaires** ou embarquées,
 - ✓ Stockage à court ou long terme,
 - ✓ Puissances maximales différentes.
- ✓ Importance de la définition des caractéristiques
 - Critères :
 - ✓ de comparaison des technologies
 - ✓ de dimensionnement (voire de gestion)

Stockage d'électricité - principales caractéristiques

- **Capacité énergétique W_{stoc} (en Wh)**

- ✓ Critère fortement dimensionnant

- ✓ Energie utilisable $W_{\text{util}} < W_{\text{stoc}}$

- ✓ limitée par le **rendement**

- ✓ limite de décharge profonde (**état de charge minimal**)

➔ Nécessité d'évaluer W_{util}

Stockage d'électricité - principales caractéristiques

- **Puissance maximale P_{\max} de charge et de décharge**
(parfois différentes)
- «**Constante de temps**» t $\frac{W_{\text{util}}}{P_{\max}} = \tau$

✓ **Exemple** : système de stockage hydraulique gravitaire

Masse d'eau
Dénivelée entre les bassins hauts et bas

} Capacité de stockage

Puissance des groupes réversibles
turbines-machines électriques

} Puissance maximale

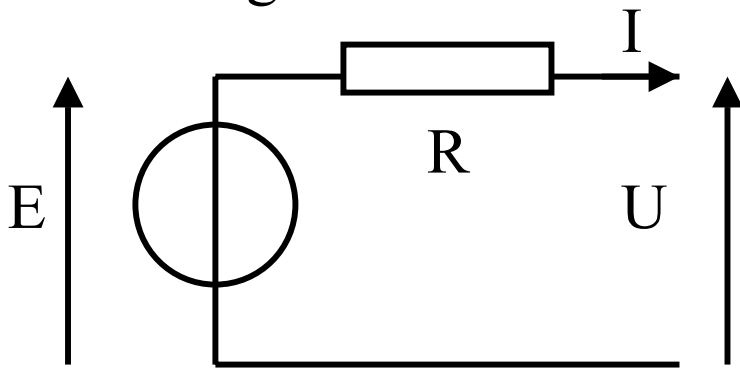
Découplage Energie Puissance : constante de temps ajustable

Stockage d'électricité - principales caractéristiques

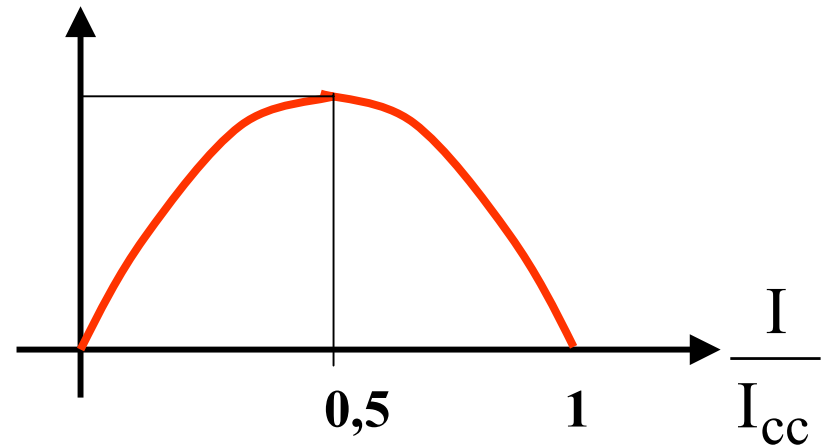
- **Rendement η** =
$$\frac{\text{Energie restituée}}{\text{Energie emmagasinée}}$$
- Définition souvent simpliste (fournie pour un seul point de fonctionnement)
- Le rendement doit être défini sur des **cycles réalistes** typiques de l'application.
- Il dépend de la puissance instantanée
 - Pour un système optimisé avec une faible constante de temps :
 - meilleur rendement pour des **sollicitations rapides**
 - éventuellement une forte auto-décharge

Analyse du rendement – modèle simplifié

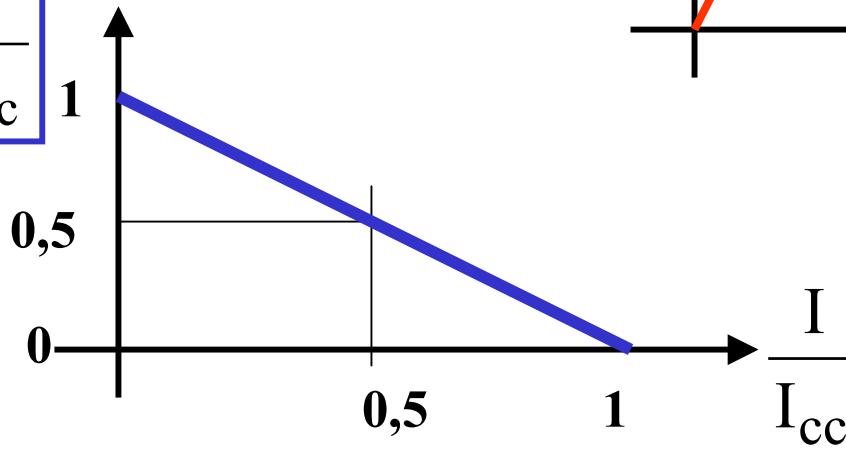
Décharge :



$$P_u = E.I - R.I^2 = \frac{E^2}{R} \left[\frac{I}{I_{cc}} - \left(\frac{I}{I_{cc}} \right)^2 \right]$$



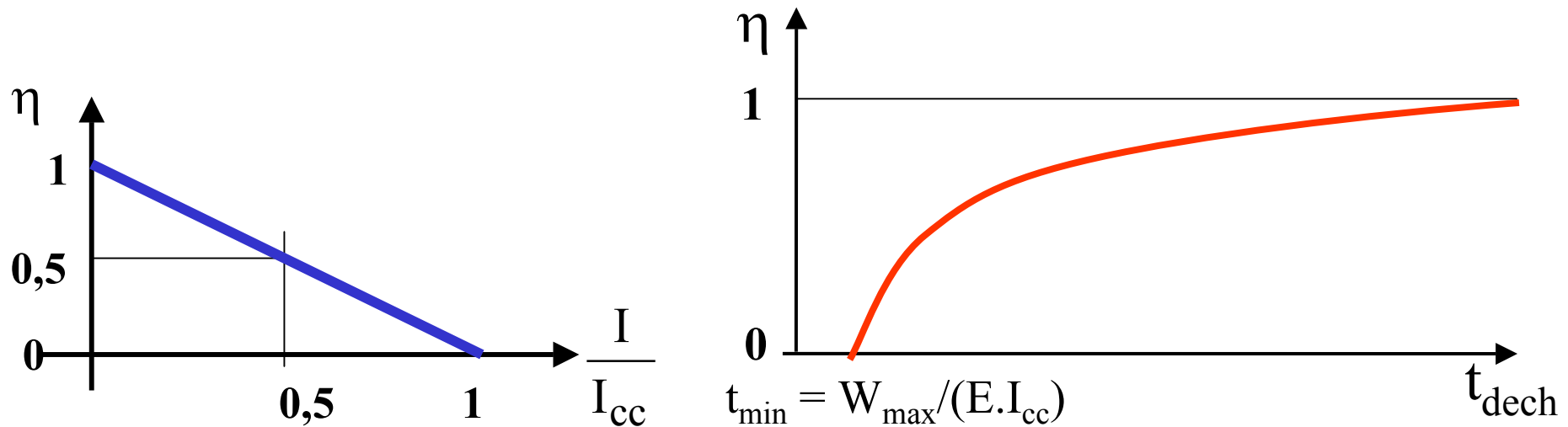
$$\eta = 1 - \frac{I}{I_{cc}}$$



Analyse du rendement – modèle simplifié

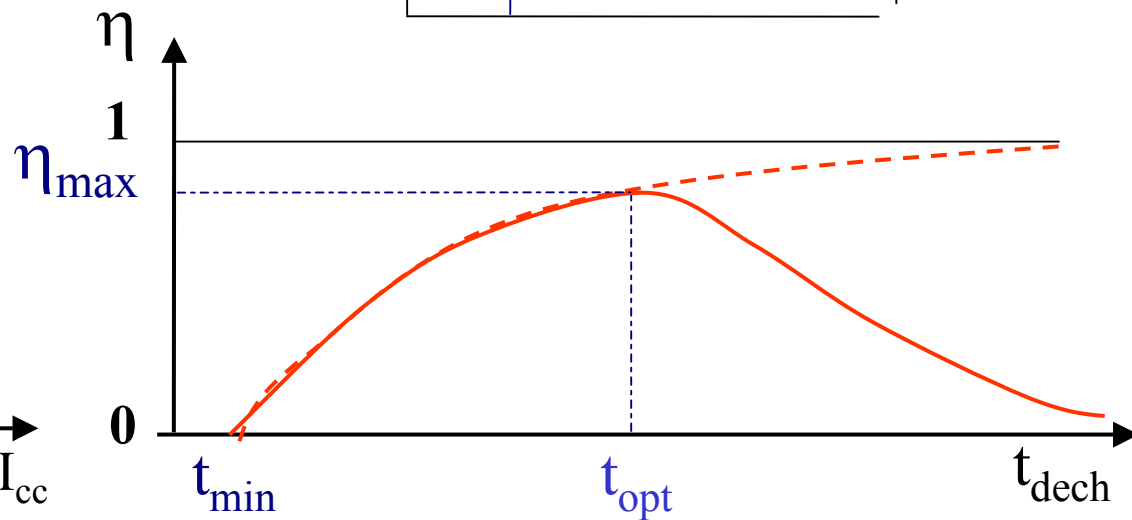
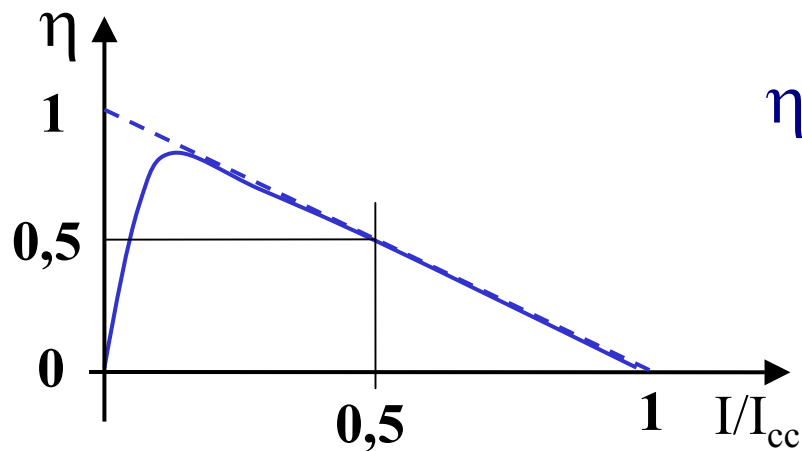
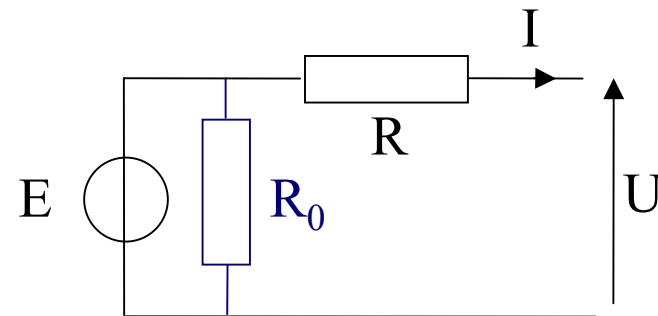
Temps de décharge (à puissance constante) :

$$t_{\text{dech}} = \frac{W_{\text{max}}}{E \cdot I} = \frac{\text{Capacité maximale}}{\text{Puissance utile} + \text{pertes}}$$



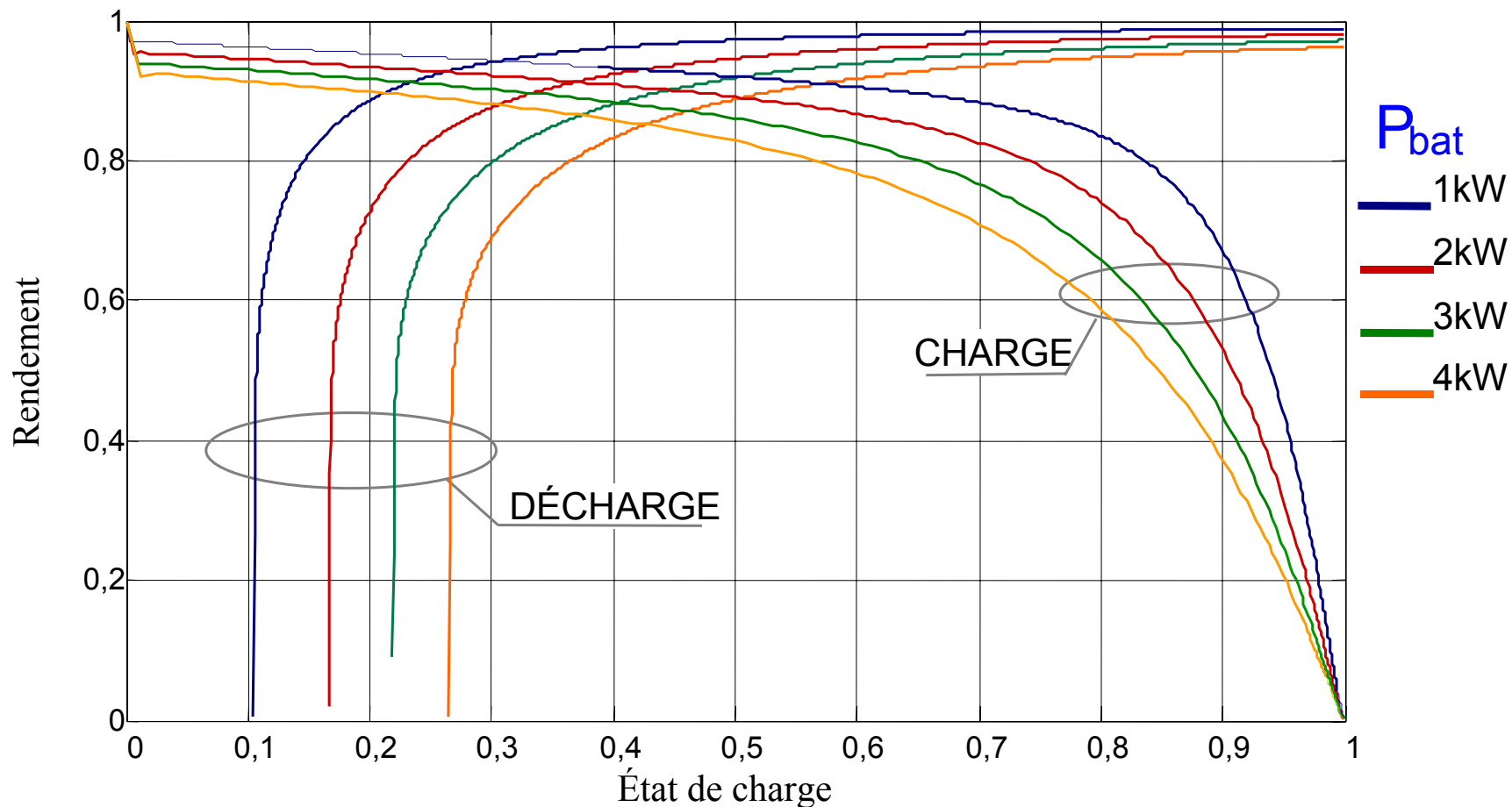
Analyse du rendement – modèle simplifié

En introduisant l'autodécharge
(par exemple : résistance en parallèle sur E)



La **capacité** (ou l'énergie récupérable) dépend du **temps de charge** ou de **décharge**.

Rendement énergétique global (accumulateurs Plomb-acide)



Accu : 48 V - C_{10} 310 A.h
(15 kWh en 10 heures)

Stockage d'électricité - principales caractéristiques

- **Nombre maximal de cycles de charge-décharge N_{cycl}**

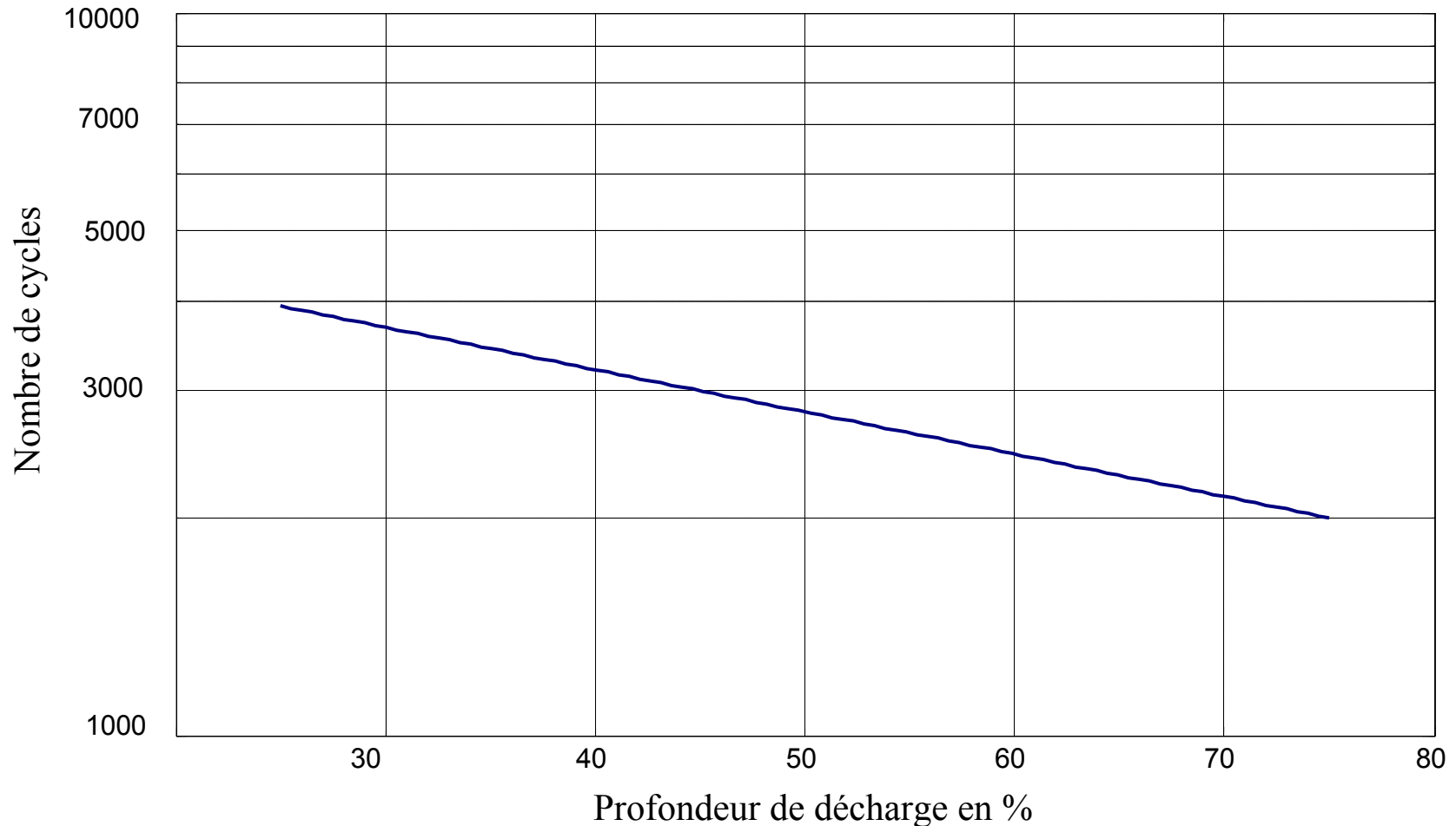
Cyclabilité

- Dû à la fatigue ou à l'usure lors des cycles

Quantification de N_{cycl} délicate → travaux de recherche à mener dans des contextes d'exploitation réalistes.

Stockage d'électricité - principales caractéristiques

Cyclabilité d'un accumulateur plomb-acide (décharges à partir de la pleine charge)



Stockage d'électricité - principales caractéristiques

- **Coûts :**
 - d'**investissement** (part la plus marquante pour l'acheteur)
 - de **fonctionnement** (maintenance, énergie perdue lors des cycles, vieillissement).
- Coût d'investissement généralement spécifié
 - en €/kWh pour les accumulateurs à longue constante de temps (dimensionnés en Energie)
 - en €/kW pour ceux plutôt dimensionnés en puissance, à faible constante de temps
- Ce qu'il faudrait faire :
 - coût d'investissement total : $C_{inv_tot} = c_W \cdot W_{util} + c_P \cdot P_{max}$
 c_W en €/kWh et c_P en €/kW
 - coût global sur cycle de vie : fabrication → recyclage

Stockage d'électricité - principales caractéristiques

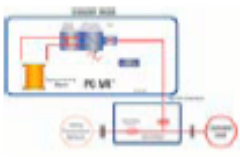


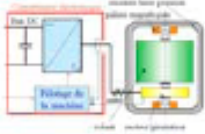


Autres caractéristiques :

- **énergie massique** (importante dans les applications embarquées),
- **énergie volumique**,
- **sécurité** (explosion, rejets...),
- **temps de réponse** (démarrage), etc...

Moyens de stockage à petite échelle – Comparatif (I)

Technologie	Inductif Supra- conducteur	Super condensateur	Electro- chimique	Volant Inertie	Air comprimé en bouteille	Hydrogène PAC réversible
Forme d'énergie	magnétique	électrostatique	chimique	mécanique	air comprimé	carburant
Densité d'énergie (accumulateur seul, hors équipements annexes)	1 à 5 Wh/kg	10 Wh/kg → 60 Wh/kg	20 à 120 Wh/kg	1 à 5 Wh/kg	8 Wh/kg (200 bars)	300 à 600 Wh/kg (200 à 350 bars) hors PAC
Capacité réalisable ou réalisée	qq kWh	qq kWh	qq Wh à qq MWh	qq kWh à qq 10 kWh	qq kWh à qq 10 kWh	NA
Constante de temps	qq s à 1 mn	qq s à qq mn	qq 10 mn (NiCd) à qq 10 heures (Pb)	qq mn à 1 h	1 h à qq jours (peu d'auto- décharge)	1 h à qq jours (peu d'autodécharge)

Moyens de stockage à petite échelle – Comparatif (II)

						
Cyclabilité	qq 10 000 à qq 100 000	qq 10 000 à qq 100 000	qq 100 à qq 1000	qq 10 000 à qq 100 000	qq 1000 à qq 10 000	??
Cause	fatigue mécanique	fatigue mécanique	dégradations chimiques	fatigue mécanique	fatigue mécanique	
Rendement électrique	> 0,9	0,8 à > 0,9 selon régime	0,7 à 0,8 selon techno et régime	0,8 à > 0,9 selon régime	0,3 à 0,5 selon régime	0,3 à 0,5
Connaissance de l'état de charge	Aisée (courant)	Aisée (tension)	Difficile Paramètres variables	Aisée (vitesse)	Aisée (pression)	Aisée (remplissage H2)
Coût en €/kWh	500 à 72000	50 000 à 150 000 (dimensionnement en puissance)	Pb-acide : 50 à 200 Lithium : 700 à 1000	150 à 2000 (massif) ≈ 25000 (composite)	?	15
Coût en €/kW	≈ 300	≈ 300	250 à 1500	300 à 350	?	6000
Remarques	Cryogénie	Grande cyclabilité	Technologie mature	Coût global compétitif sur la durée de vie	Rendement faible	Intéressant si contexte de réseau d'hydrogène

Moyens de stockage à grande échelle

- Réseau de distribution
- Fermes éoliennes, photovoltaïques, houlomotrices...

Batteries électrochimiques : expérience à grande échelle...

- **Exemple** Nickel-Cadmium (1000 tonnes)
Fairbanks Alaska (2003)

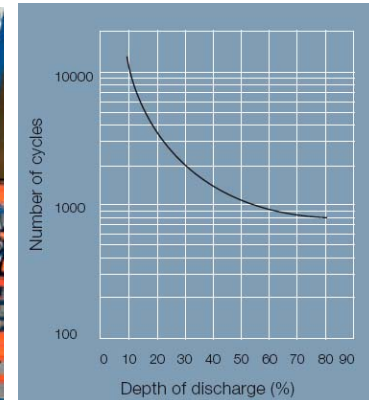
Capacité :

40 MW durant 7 mn (4,7 MWh)

ou 27 MW durant 15 mn (6,7 MWh)

Coût :

4000 Euros/kWh ou 700 Euros/kW



Durée de vie
escomptée :

25 ans

Moyens de stockage à grande échelle – Comparatif

Technologie	Hydraulique gravitaire	Air comprimé en caverne	Batteries électrochimiques	Batteries à circulation	Thermique à turbine
Densité d'énergie	1 kWh/m ³ pour une chute de 360 m	12 kWh par m ³ de caverne à 100 bars	Batterie au plomb : 33 kWh/t Batterie Li-ion : 100 kWh/t	33 kWh/m ³	200 kWh/m ³
Capacité réalisable	1000 – 100000 MWh	100 – 10000 MWh	0,1 – 40 MWh	10 – qq 100 MWh	1000 – 100000 MWh
Puissance réalisable	100 – 1000 MW	100 – 1000 MW	0,1 – 10 MW	1 – qq 10 MW	10 – 100 MW
Rendement électrique	65% - 80%	50% (avec l'apport de gaz naturel)	70% ou moins en décharge rapide	70%	60%
Installations existantes	100 000 MWh 1000 MW	600 MWh 290 MW	40 MWh 10 MW	120 MWh 15 MW	----
Coût €/kWh et €/kW	70 à 150 600 à 1500	50 à 80 400 à 1200	200 (Pb) à 2000 (Li) 300 (Pb) à 3000 (Li)	100 à 300 1000 à 2000	50 350 à 1000
Maturité	Très bonne	Plusieurs expériences au monde	Plusieurs expériences avec des technologies matures	En développement prototypes en fonctionnement	A l'état de projet
Remarques	Sites avec dénivelée et retenues d'eau	Sites avec cavernes	Métaux lourds	Produits chimiques	Indépendant des contraintes géographiques

Conclusion

- ✓ Définitions des principales caractéristiques
 - ✓ comparaison difficile entre des technologies très différentes
 - ✓ besoins en R&D → amélioration des modèles de rendement et de vieillissement

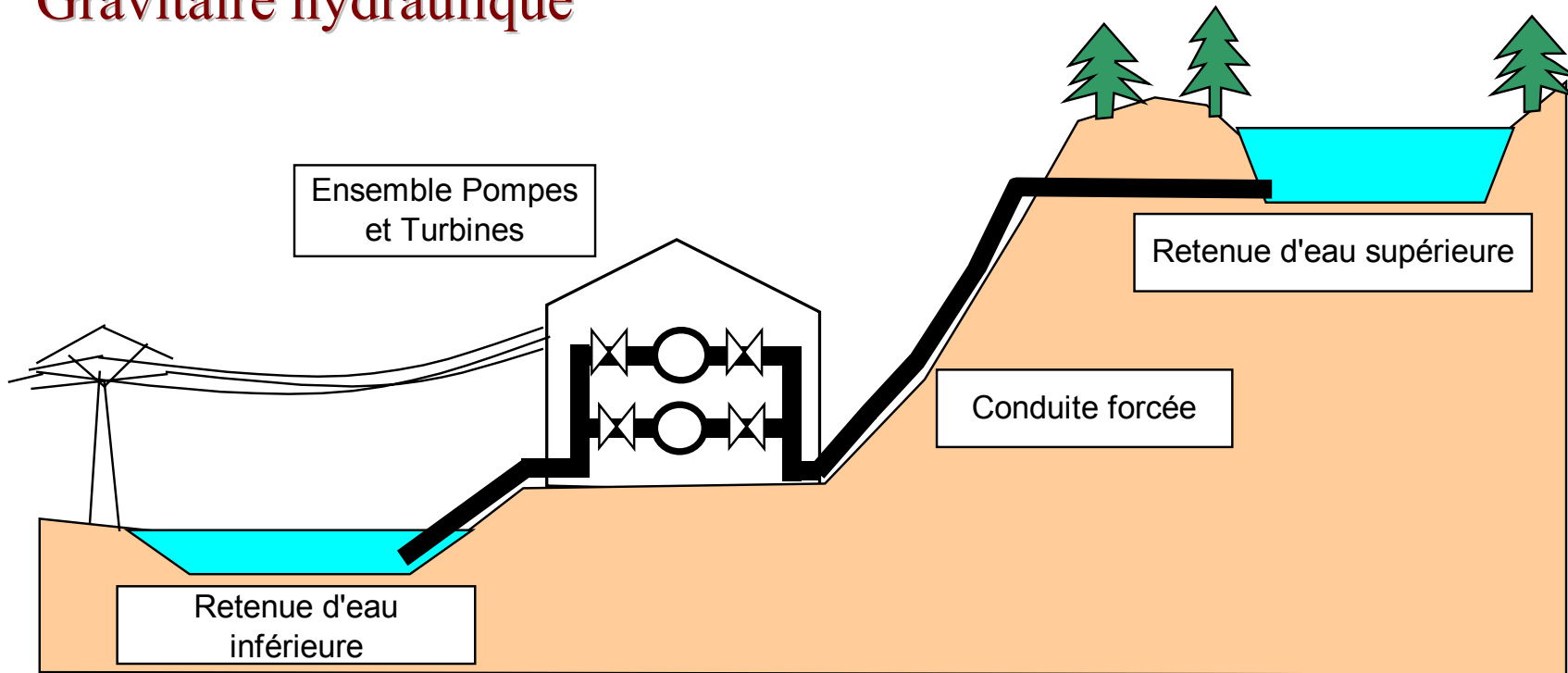
- ✓ Travaux de recherches sur l'optimisation de dimensionnement et de gestion du stockage et d'une «consommation intelligente»

- ✓ Travaux nécessaires sur l'évaluation du coût énergétique global sur la durée de vie

Merci pour votre attention...



Gravitaire hydraulique



Rendement : 65 à 75 %

Démarrage : 10 à 15 min

Capacité : 1 à qq 100 GWh

Puissance : 100 à 1000 MW



Exemple : Grand-Maison
935 m de dénivelée, 170 Mm³
400 GWh
12 groupes 150 MW
1400 MW en pompe
1800 MW en turbinage

