



cea

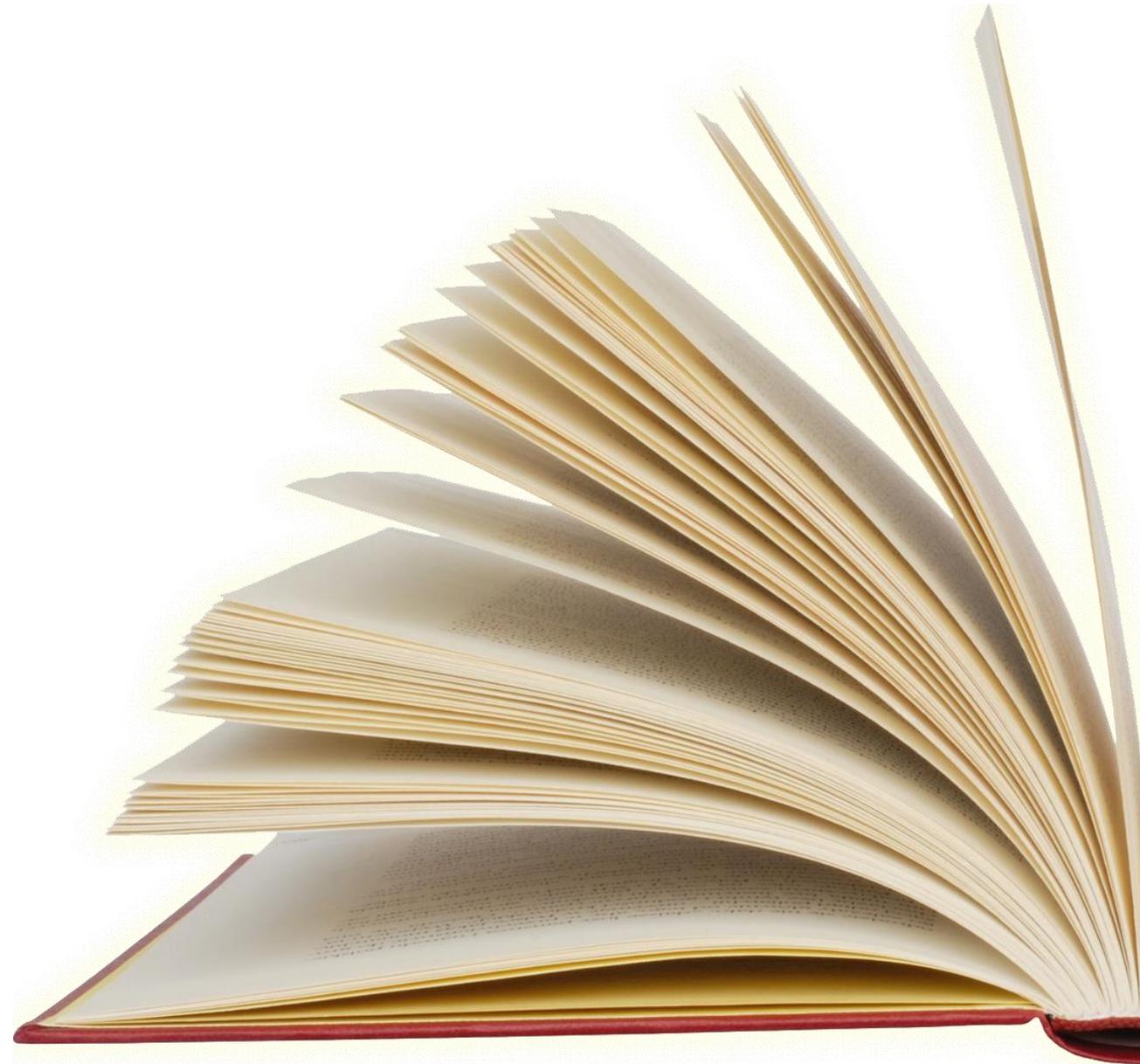
Le potentiel des batteries pour le stockage d'énergie

Mikaël Cugnet, Université Populaire de Montélimar, Mardi 23 mars 2021



PLAN DE LA PRÉSENTATION

- Le CEA
- Le stockage d'énergie
- Les batteries ou le début de l'électricité
- Les batteries – principes généraux
- Les batteries – technologies
- Questions / réponses



PRÉSENTATION DE L'ORATEUR



Mikaël Cugnet, HDR, ingénieur-chercheur CEA



- **Licence (2002), Master (2004) et Doctorat (2008)** en Automatique (Université Bordeaux I)
- **Thèse** intitulée “Intégration du vieillissement à la gestion des batteries Pb automobile” en collaboration avec



- Conception d’un estimateur d’état batterie utilisant une méthode d’invalidation de modèles fractionnaires

- **Post-doctorat** encadré par B.Y. Liaw au sein du



Hawai'i Natural Energy Institute

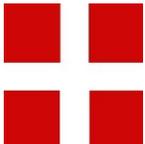
School of Ocean and Earth Science and Technology
University of Hawai'i at Mānoa

- Modélisation multiphysique des batteries Pb ouvertes et étanches sous COMSOL Multiphysics and Matlab
- Investigation de cellules Li-ion commerciales choisies pour les applications PHEV

- **Expert batterie** à l'INES (Le Bourget-du-Lac) rattaché au CEA Grenoble

- Analyse et diagnostic de différentes technologies de batteries pour les applications transport (cellules et modules)
- Modélisation multiphysique des batteries Pb-acide, Li-ion, Na-ion, Na-MCl₂ sous COMSOL Multiphysics et Scilab
- Montage et gestion de projets industriels et européens
- Encadrement d’étudiants en thèse ou en master, cours en école d’ingénieur et universités, conférences

Contact: mikael.cugnet@cea.fr





DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

C'EST GRÂCE AU CEA QU'ILS EXISTENT...

La dissuasion
nucléaire française



La première thérapie génique
contre la maladie de Parkinson
et la bêta-thalassémie
(*maladie héréditaire du sang*)



Le parc électronucléaire français
Le retraitement des combustibles
(*1^{ère} mondiale*)

La vitrification des déchets nucléaires
(*maîtrise du stockage*)



La technologie des écrans plats

Le système de déclenchement des airbags

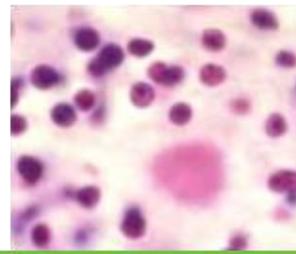
Le contrôle des pièces automobiles,
aéronautiques et nucléaires par ultra-son



Le 1^{er} scanner français

Maladie de la vache folle :
test européen de dépistage

1^{er} test rapide de dépistage d'Ebola



Les aimants supraconducteurs et les
expériences Atlas et CMS au CERN
(pour la découverte du Boson de Higgs)

La technologie de dépollution par fluides
supercritiques (*chimie verte*)



UNE CONTRIBUTION AU DÉVELOPPEMENT DE FILIÈRES-CLÉS

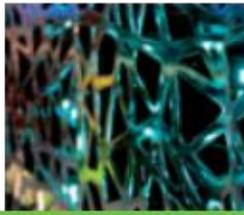
Manufacturing
Ingénierie numérique



Nucléaire : production
d'électricité et cycle



Calcul haute
performance



Assainissement
et démantèlement



Micro-
nanoélectronique



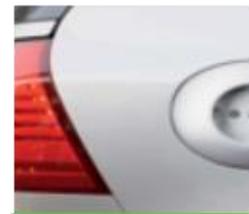
Énergie
solaire



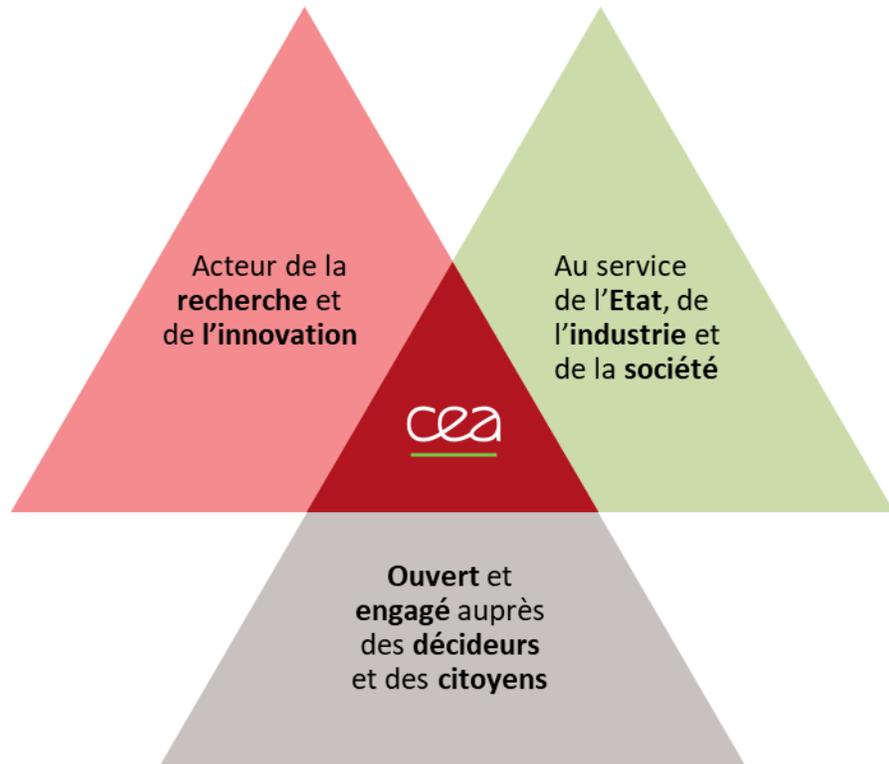
Conception de Très
Grands Instruments de
Recherche (TGIR)



Mobilité : stockage de
l'électricité, hydrogène,
pile à combustible



UN ORGANISME PUBLIC DE RECHERCHE SINGULIER PORTEUR DE MISSIONS STRATÉGIQUES POUR L'AVENIR



19 925
salariés



Défense et sécurité
du pays



Énergies nucléaire
et renouvelables



1 351
doctorants
et post-doctorants

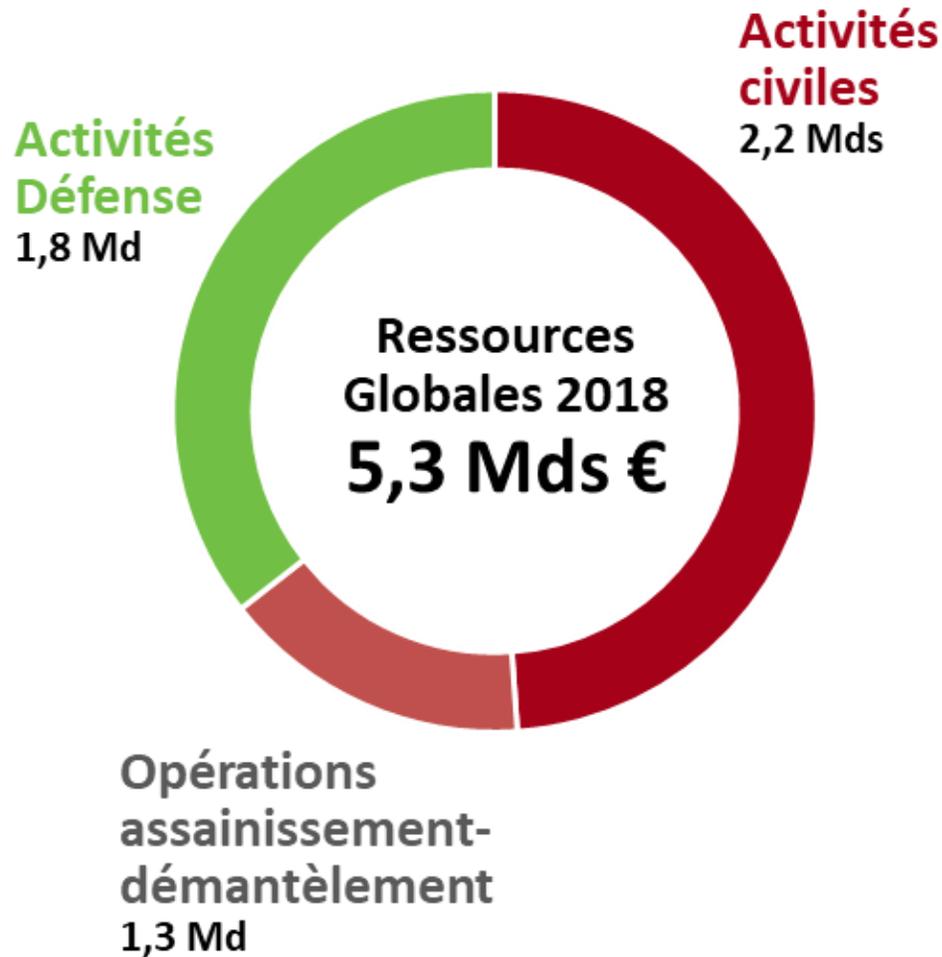


Recherche technologique
pour l'industrie



Recherche fondamentale

RÉPARTITION DES MOYENS



Ressources financières externes des activités civiles (réalisé 2018)



Energie nucléaire **37 %**



Technologies pour l'industrie et la communauté scientifique **75 %**



Socle de recherche fondamentale **17 %**



Autres dépenses (support, sécurité, sûreté, enseignement) **18 %**

UNE IMPLANTATION SUR L'ENSEMBLE DU TERRITOIRE

9 centres

Cadarache (nucléaire fission, fusion, propulsion, nouvelles technologies de l'énergie)

Cesta (architecture et garantie des têtes nucléaires, Laser Mégajoule)

DAM Île-de-France (physique des armes nucléaires, simulation numérique, lutte contre la prolifération nucléaire et le terrorisme, ingénierie, Très Grand Centre de Calcul, Centre d'alerte aux tsunamis)

Gramat (vulnérabilité des systèmes d'armes et efficacité des armements)

Grenoble (nouvelles technologies pour l'énergie, la santé, l'information et la communication, nanosciences, cryogénie, biosciences et biotechnologies)

Le Ripault (matériaux non nucléaires pour la dissuasion, pile à combustible, stockage de l'hydrogène),

Marcoule (nucléaire : cycle, déchets)

Paris-Saclay (nucléaire, climat et environnement, sciences de la matière, recherche technologique, sciences du vivant et de la santé)

Valduc (matériaux nucléaires pour la dissuasion, installation radiographique Epure)

5 plates-formes régionales de transfert technologique

Nantes, Bordeaux, Toulouse, Metz, Lille



LE CEA ET LA CRÉATION DE VALEUR ÉCONOMIQUE

Création d'entreprises

- ▶ **Incubation d'activités industrielles**
(STMicroelectronics, Areva, Soitec,...)
- ▶ **Création de start-up**
(195 depuis 1972)
- ▶ **Catalyse d'investissements technologiques**
(au travers de la filiale CEA Investissement)

Achats

- ▶ **2,4 Mds € annuels d'achats** de hautes technologies

45 000 emplois qualifiés créés
(directs, indirects et induits)

1^{er} organisme innovant au monde*

Propriété intellectuelle

- ▶ **6 100 familles de brevets actives**
Dépôts de ≈ 750 brevets prioritaires par an

Partenariats industriels

- ▶ Environ **600 partenariats industriels** simultanés dans tous secteurs d'activité

* (cf. Thomson Reuters 2016)

LA RECHERCHE TECHNOLOGIQUE : ACCÉLÉRATEUR D'INNOVATION AU SERVICE DE L'INDUSTRIE

Un large portefeuille
de **technologies**
« **génériques** »



TIC



Technologies
pour la santé



Énergies
renouvelables



Systèmes
numériques
intelligents



Matériaux et
procédés

900 partenaires
industriels dans tous
les domaines d'activités



Transport et
mobilité



Filière agro-
agri



Santé et
environnement



Sécurité et
défense



IoT

32 plates-formes
technologiques au
meilleur niveau
mondial



Plate-forme
nanoélectronique
300mm



Plate-forme
solaire
photovoltaïque



Plate-forme
robotique
collaborative



Plate-forme
Clinatex



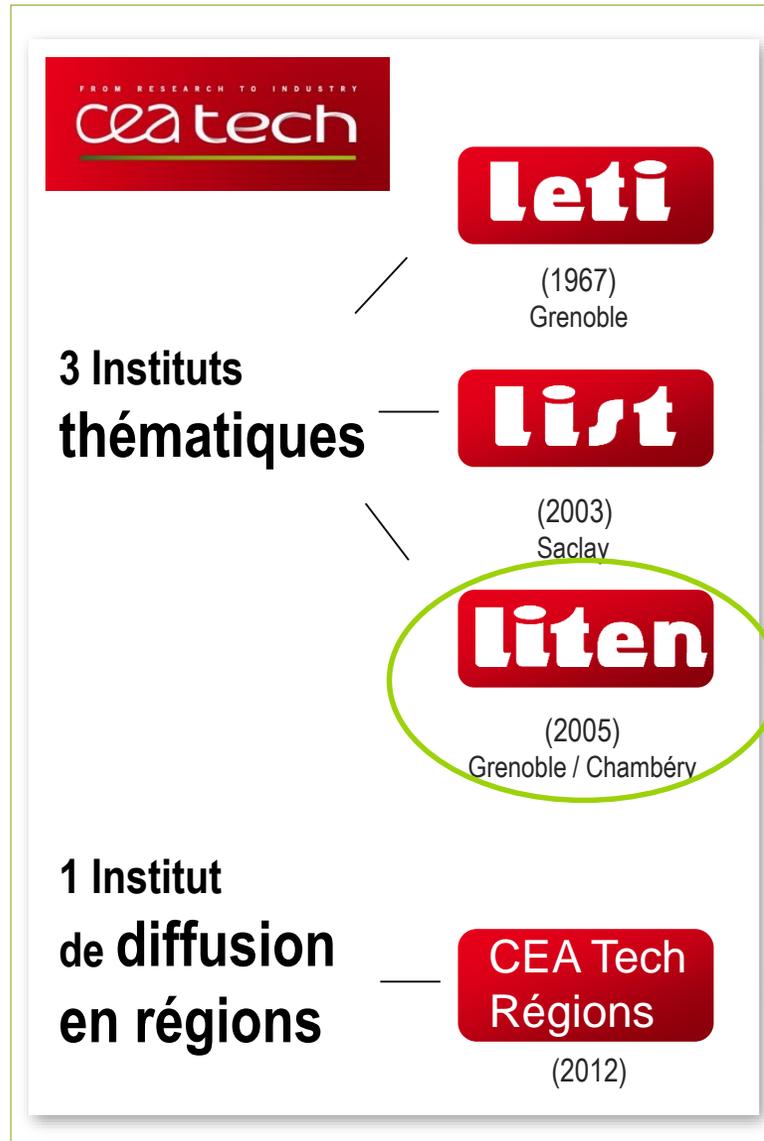
Plate-forme
Nano-caractérisation

QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATIONS TECHNOLOGIQUES

- ▶ Mems dans tous les airbag
(détection de chocs)
- ▶ Micro-écrans ultra-résolus et basse consommation
- ▶ Détection de piétons par imageur bolométrique (véhicules)
- ▶ Gestion des batteries (domotique)
- ▶ Technologie d'assemblage industriel (verrerie...)
- ▶ Contrôle non destructif par ultrasons (production automobile, sidérurgie, nucléaire)
- ▶ Manipulation des charges lourdes (cobotique et exosquelettes)
- ▶ Diagnostic de réseaux de câbles par réflectométrie (aéronautique, ferroviaire)



CEA TECH : 3 INSTITUTS AU SERVICE DES INDUSTRIELS



Micro et nanotechnologies et intégration dans les systèmes
 — 280 M€ - 2100 pers. (1800 CEA)

Systèmes à logiciel prépondérant
 — 80 M€ - 1000 pers. (800 CEA)

Nouvelles technologies de l'énergie / Nanomatériaux
 — 180 M€ - 1200 pers. (1000 CEA)



PRINCIPALES IMPLANTATIONS DU CEA LITEN



Le Bourget du lac (Savoie)



GIANT
INNOVATION CAMPUS

Grenoble (Isère)



tenerdis
ENERGY CLUSTER

Auvergne-Rhône-Alpes

Pôle de compétitivité de la
transition énergétique

INES : INSTITUT NATIONAL DE L'ÉNERGIE SOLAIRE



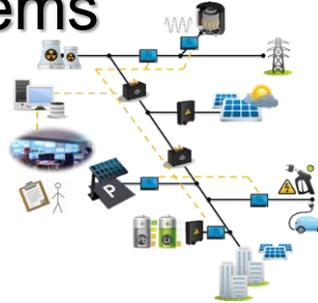
Photovoltaic



material
cells
modules
equipment
process

Systems

software
electronics
storage
grid
mobility & loading



Building

thermal systems
envelope
management



~ 450-500 personnes



~ 70 brevets par an



200 partenaires industriels



Budget ~ 60 M€

Contribuer aux Plans climatiques national et européen

Soutenir l'industrie par le biais de technologies intégrées dans les systèmes clés

Contribuer à l'Indépendance Énergétique de la France



LE STOCKAGE DE L'ENERGIE



EST-CE FACILE DE STOCKER L'ÉNERGIE ?

- **Bien sûr qu'il est facile de stocker l'énergie**
 - Il suffit d'avoir :
 - un réservoir de fioul chez soi,
 - le plein d'essence dans la voiture,
 - un tas de charbon dans la cave,
 - ou encore une pile électrique.
- **Intérêt de l'énergie**
 - Ce qui fait l'intérêt de l'énergie, ce n'est pas seulement d'en avoir : c'est d'en avoir quand nous en avons besoin.
 - C'est un facteur déterminant pour l'organisation de la société
- **Pourquoi stocker l'énergie électrique ?**
 - Pour disposer d'électricité en l'absence de sources (sites isolés, véhicules, navires, satellites ...)

L'ÉNERGIE SOUS TOUTES SES FORMES

- 1 kWh équivaut à :
 - Energie cinétique d'un camion de 10 t à 100 km/h
 - Energie potentielle d'un réservoir de 3,6 t d'eau situé à 100 m de hauteur
 - 86 litres d'eau à 10°C de plus que la température ambiante
 - 10 cl d'essence ou de biocarburant
 - 200 g de bois
 - 2 kg d'H₂ comprimé
 - 100 µg d'uranium
 - 30 kg de batteries Pb



Sources : <http://www.larousse.fr/encyclopedie/image/Laroussefr - Article/1010093> <http://www.manicore.com/documentation/stockage.html>

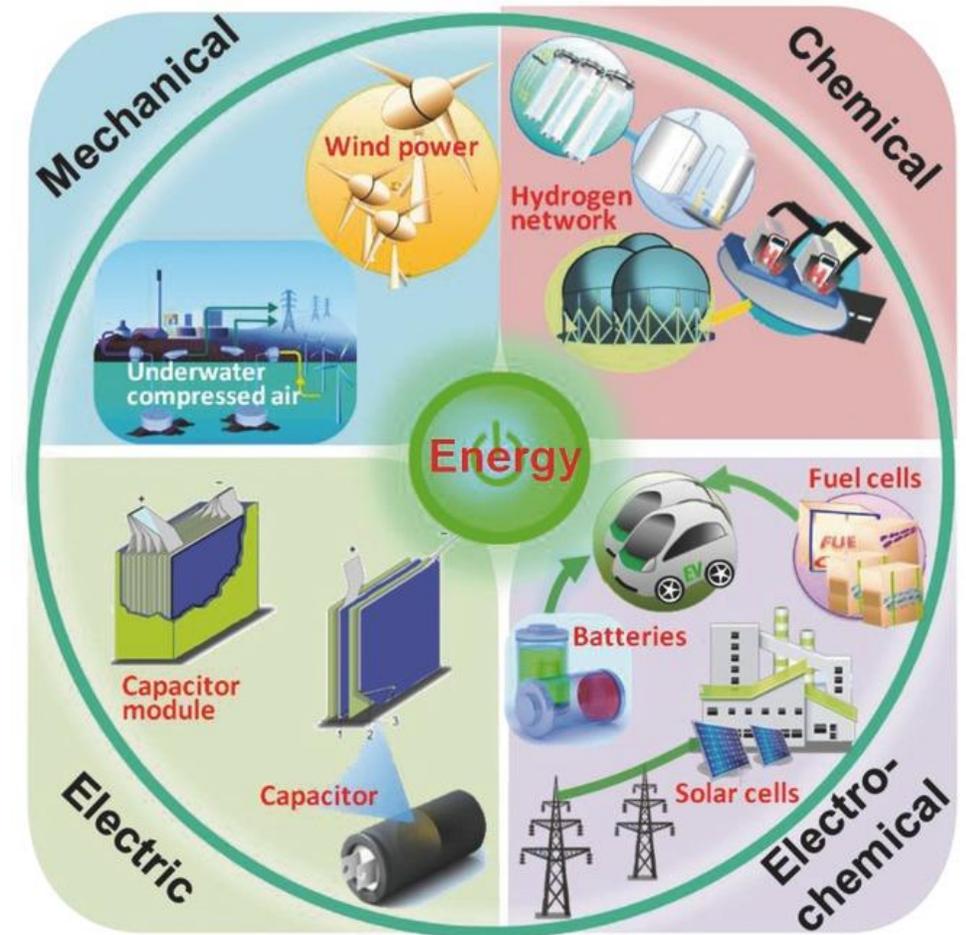
1 KILOWATT HEURE, C'EST BEAUCOUP OU C'EST PEU FINALEMENT ?

- **Pour consommer 1 kWh, il suffit de :**
 - 1 km avec une voiture qui consomme 8 litres aux 100 km
 - 5 km en train ou 200 m en semi-remorque
 - 1 réfrigérateur 1 j ou 1 congélateur ½ j ou 1 sèche linge ¼ h
 - fabriquer 200 à 500 g d'acier ou de carton (sans et avec recyclage), 100 à 200 g de plastique
 - manger 100 g de bœuf ou 500 g de porc
 - acheter 600 g de litchis ou d'ananas venus des îles par avion
 - Laisser allumée une lampe basse consommation (11 W) pendant presque 4 jours (ou laisser allumées 91 de ces lampes pendant 1h)

Sources : <http://www.manicore.com/documentation/stockage.html>

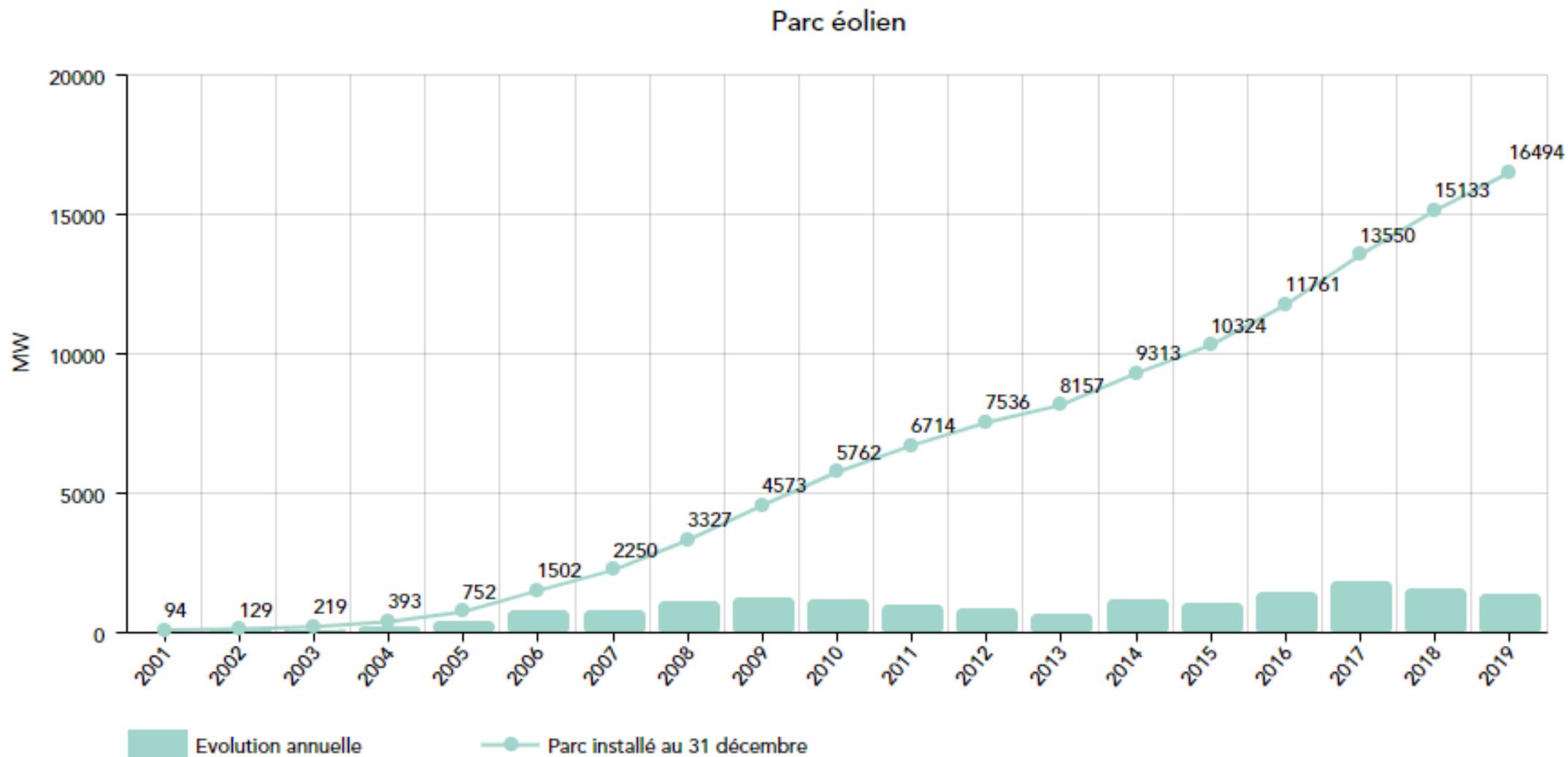
COMMENT STOCKER L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE ?

- **Directement en énergie électrique**
 - Condensateurs
 - Stockage d'énergie magnétique supraconductrice (SMES)
- **Par conversion en énergie mécanique**
 - Statique :
 - hydraulique (STEP)
 - pneumatique (CAES)
 - Dynamique : volant d'inertie
- **Par conversion en énergie chimique**
 - Batteries
 - Supercondensateurs
 - Electrolyseur + Stockage hydrogène + Pile à combustible
- **Par conversion en énergie thermique**



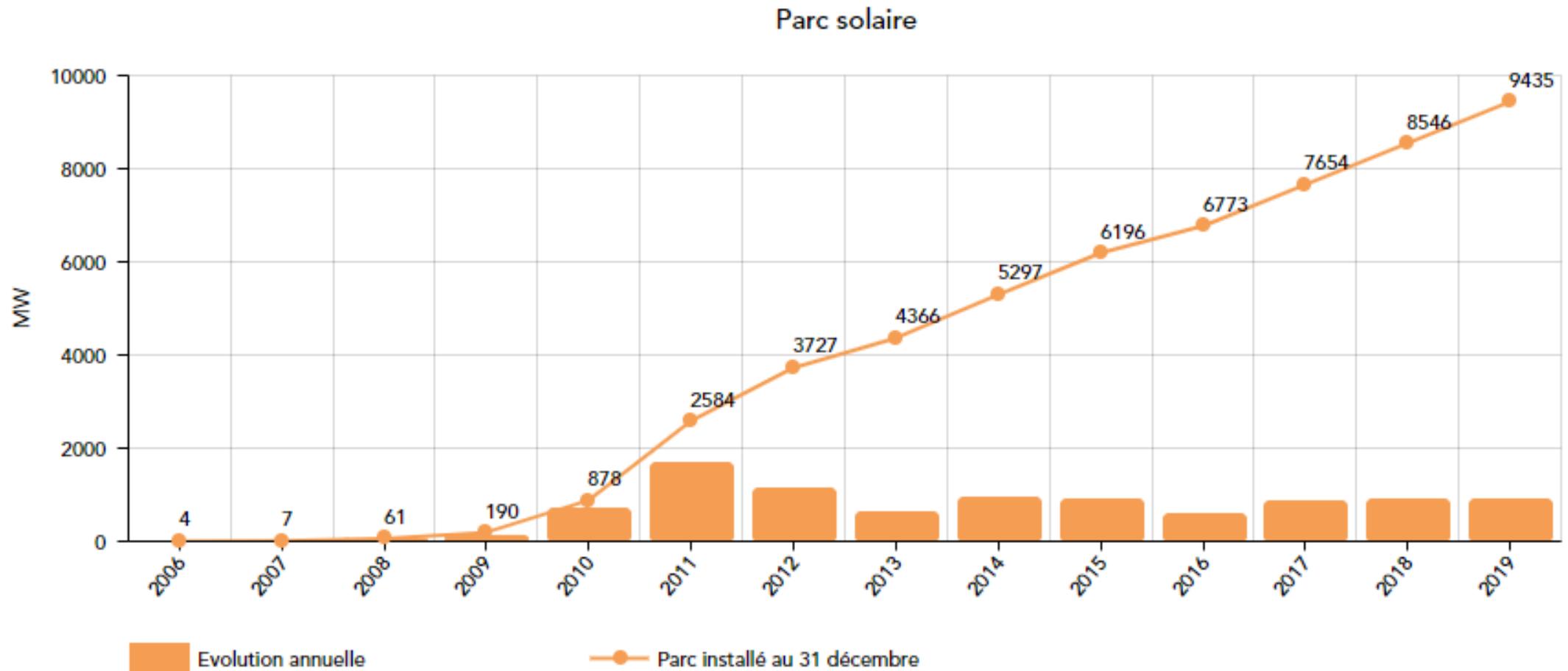
Sources : <https://images.app.goo.gl/Up7Pq5YbAxD8ES767>

POURQUOI STOCKER L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE ?



¹ Source Bilan Electrique 2019 RTE – ² Source: DataLAB

POURQUOI STOCKER L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE ?



¹ Source Bilan Electrique 2019 RTE – ² Source: DataLAB

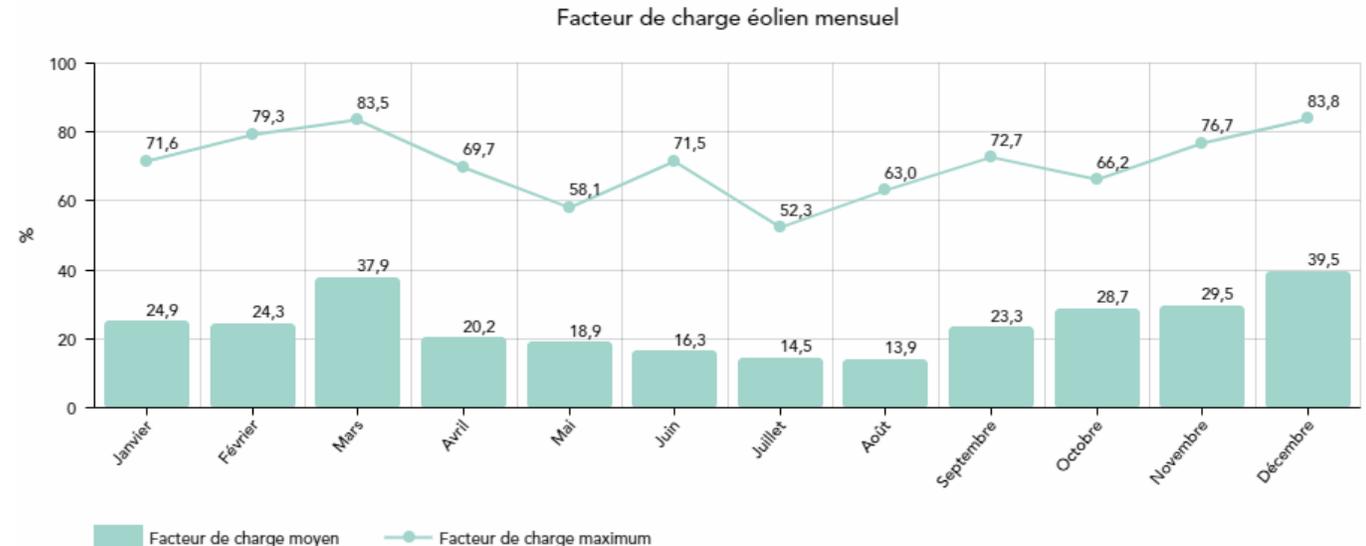
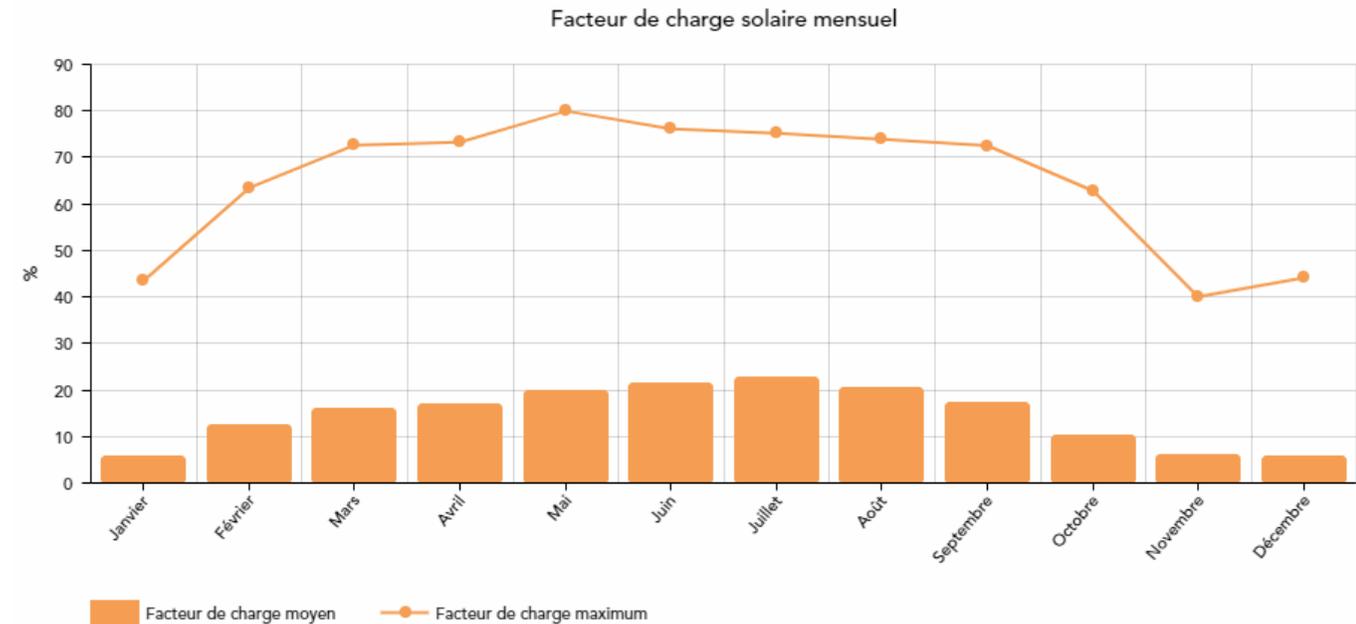
VARIABILITÉ DE PRODUCTION À INTÉGRER DANS LE DIMENSIONNEMENT ET LA GESTION DU RÉSEAU

- **Pour le PV :**

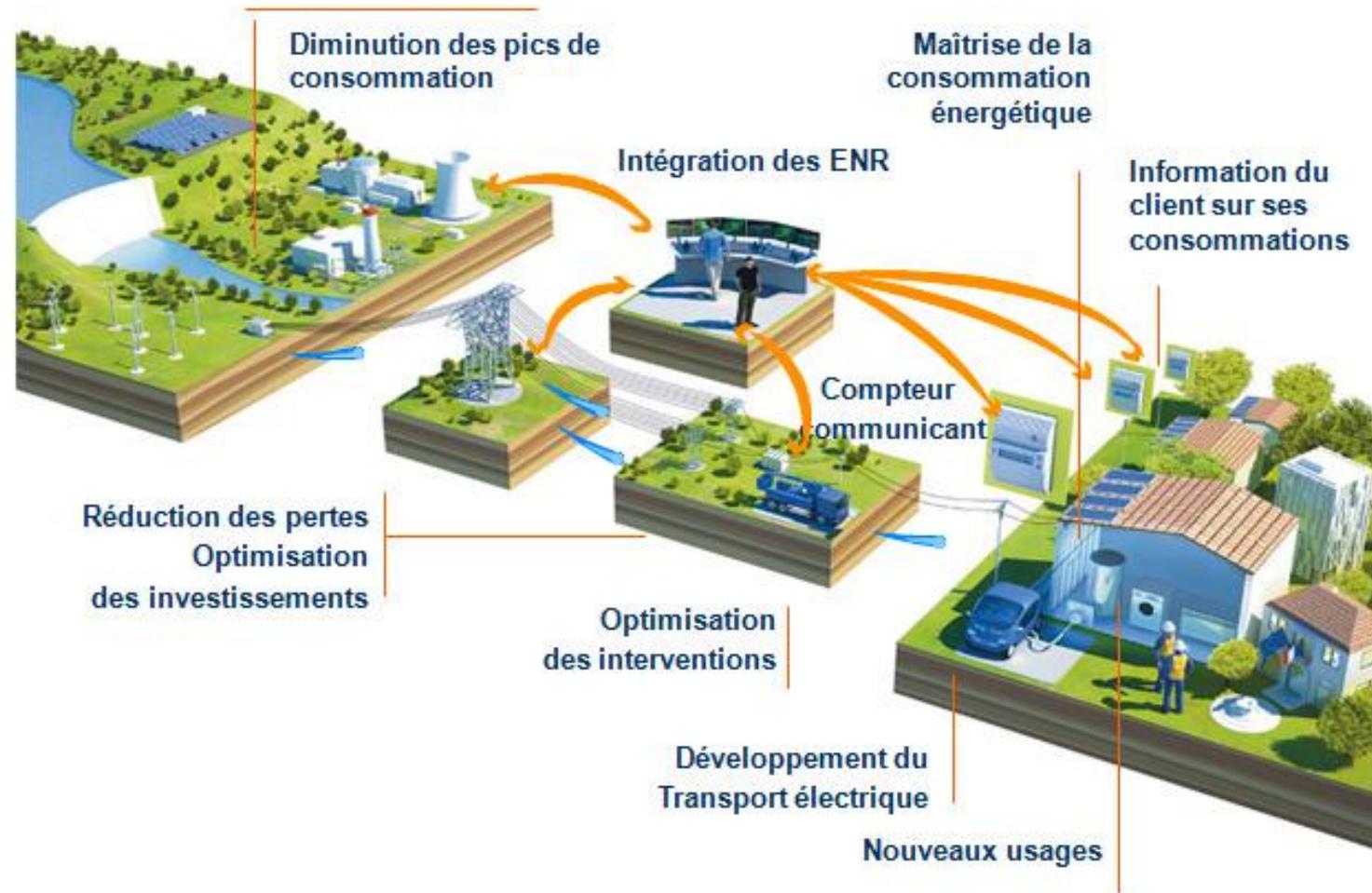
- Variations saisonnières bien marquées
- Variations intra-mensuelle non négligeables
- Pas de variation abrupte à l'échelle nationale contrairement à l'échelle locale

- **Pour l'éolien :**

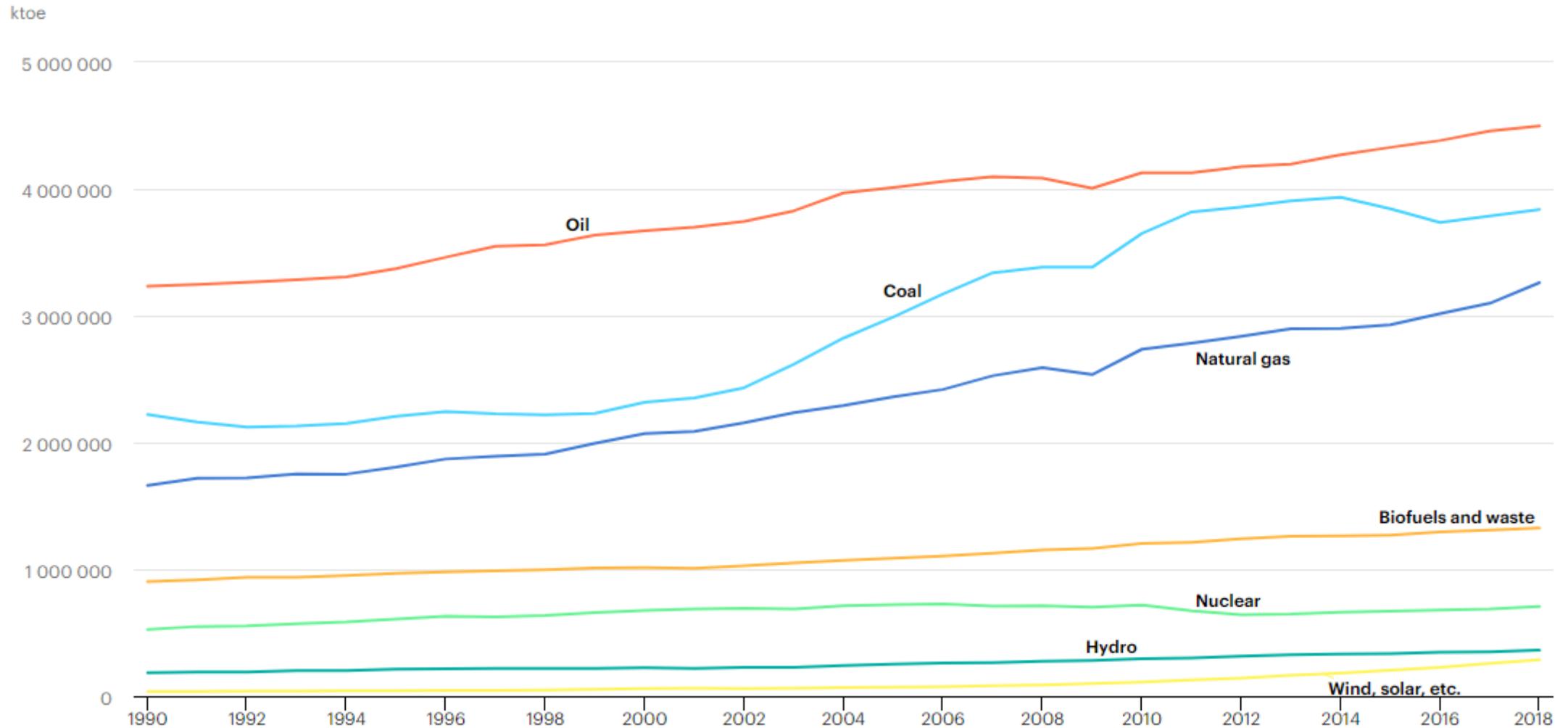
- Assez peu de variations saisonnières (un peu moins de production en été)
- Variations intra-mensuelle non négligeables
- Peut représenter une part importante de la production nationale pour quelques occurrences



UN RÉSEAU NON CONÇU POUR ÊTRE BIDIRECTIONNEL

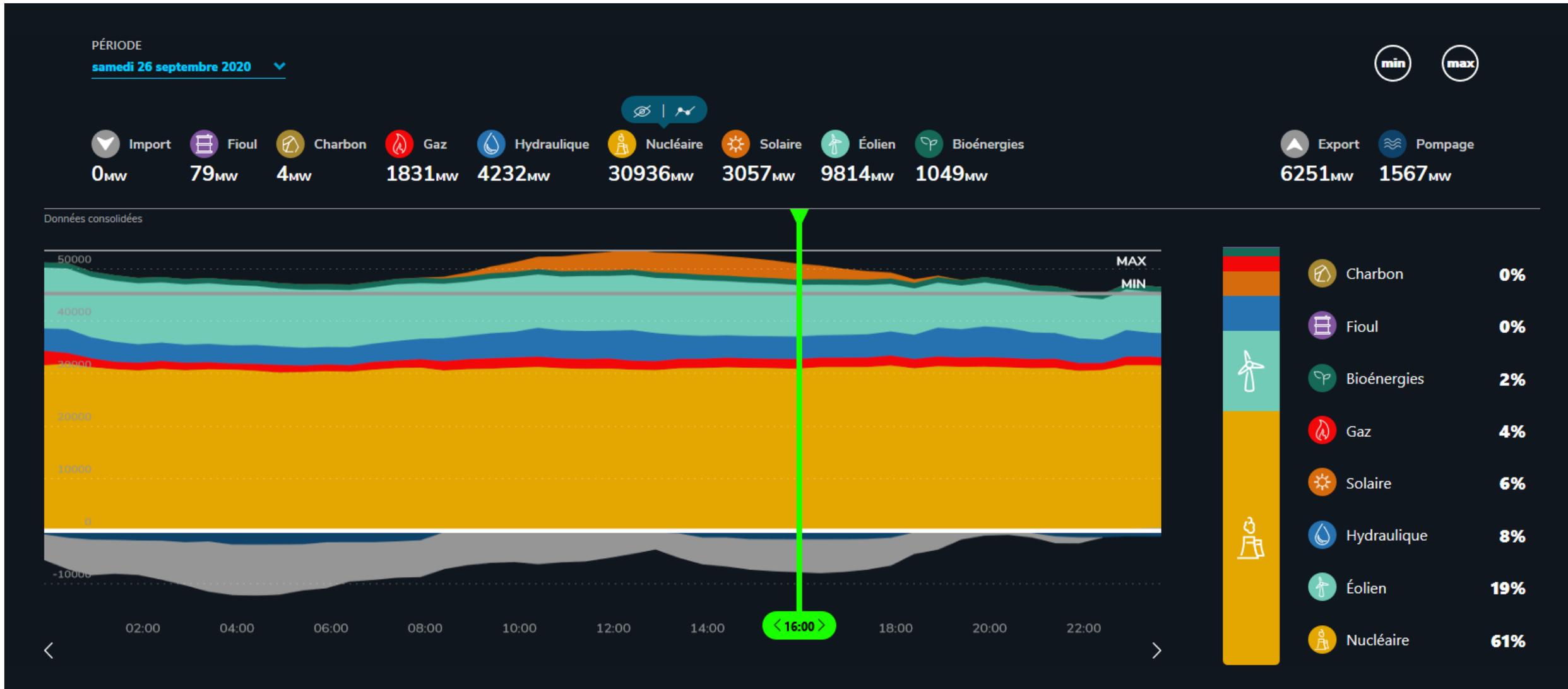


PART ENCORE FAIBLE DES ENR DANS LA PRODUCTION D'ÉNERGIE



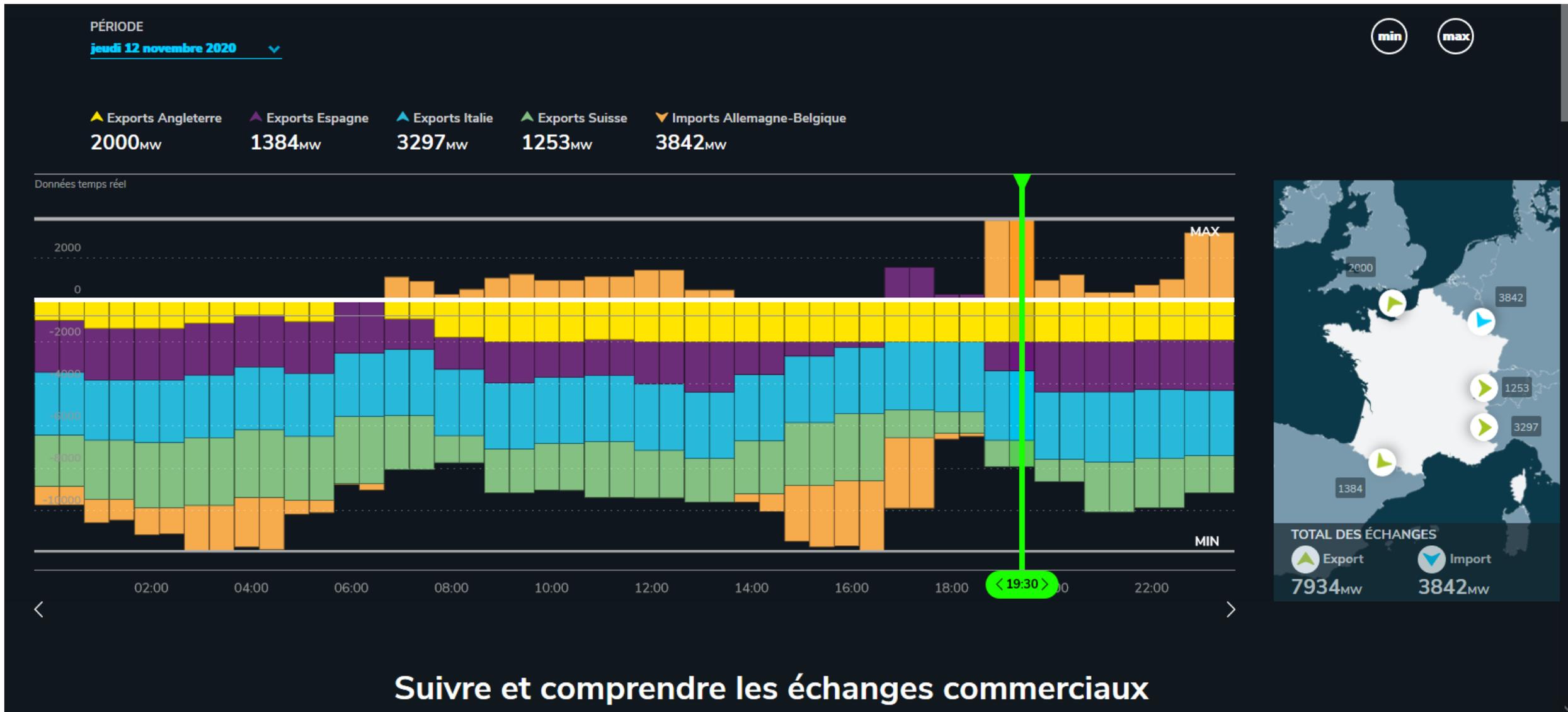
- La part des EnR dans la consommation intérieure brute d'électricité en métropole s'établit à 16 %, favorisée par la très faible augmentation de la consommation électrique totale.

LA RÉGULATION DE LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ



<https://www.rte-france.com/eco2mix/la-production-deelectricite-par-filiere#>

LA RÉGULATION DE LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ



<https://www.rte-france.com/eco2mix/les-echanges-commerciaux-aux-frontieres>

ENJEUX DU STOCKAGE STATIONNAIRE POUR L'INTÉGRATION DES ENR

→ ELECTRICITÉ PLUS PROPRE

Le stockage stationnaire contribue à la politique de transition énergétique menée en France

→ ELECTRICITÉ PLUS FIABLE

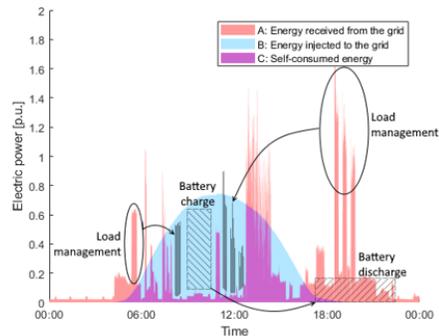
Le stockage stationnaire garantit la fourniture de l'électricité quand le vent ne souffle plus ou le soleil ne brille plus

→ ELECTRICITÉ PLUS SÛRE

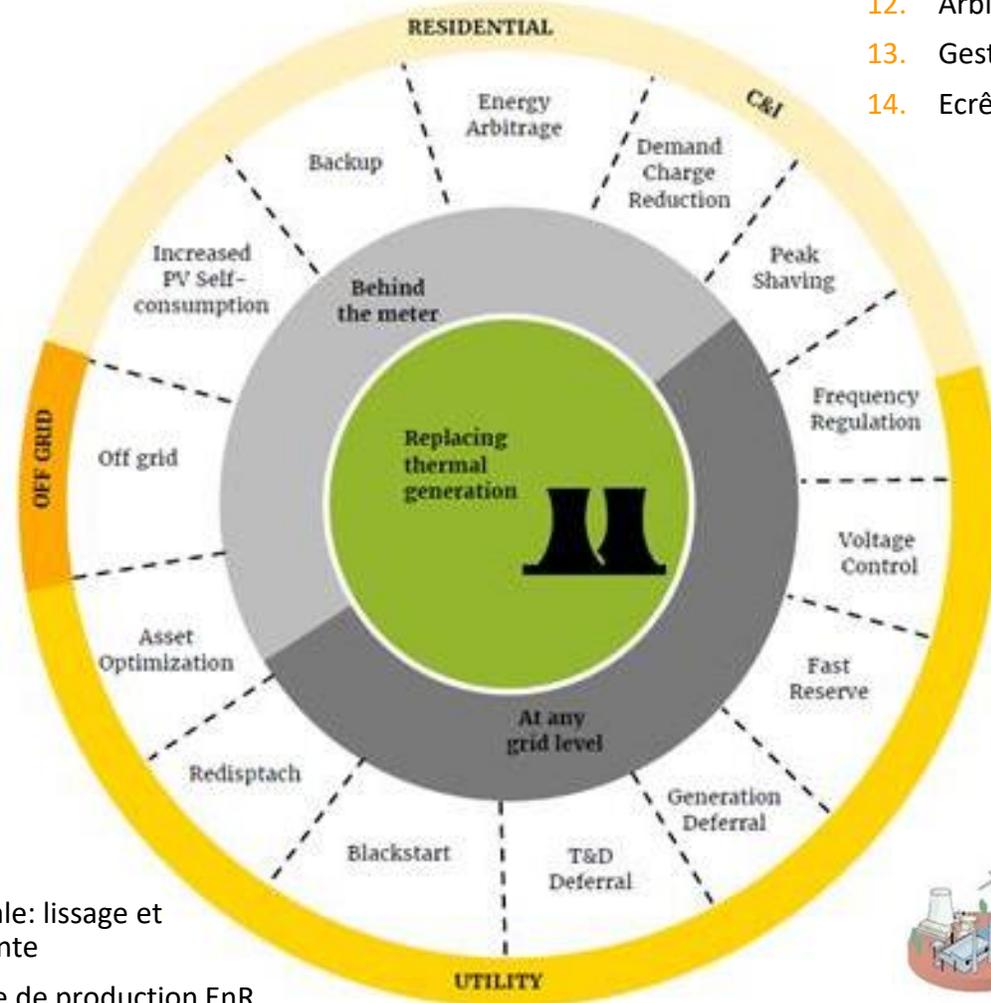
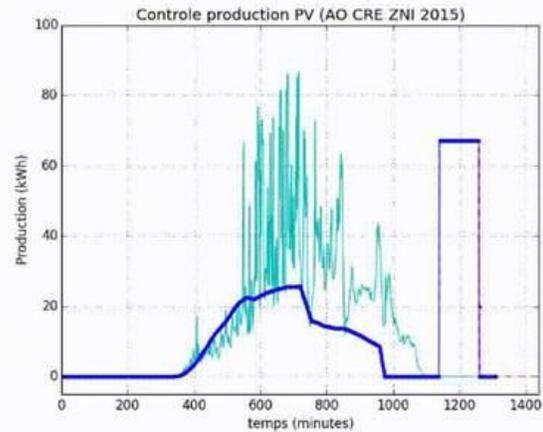
Le stockage stationnaire stabilise le réseau électrique en assurant des services qui permettent une pénétration grandissante des EnR tout en sécurisant l'approvisionnement



14 MARCHÉS DE VALORISATION DU STOCKAGE !

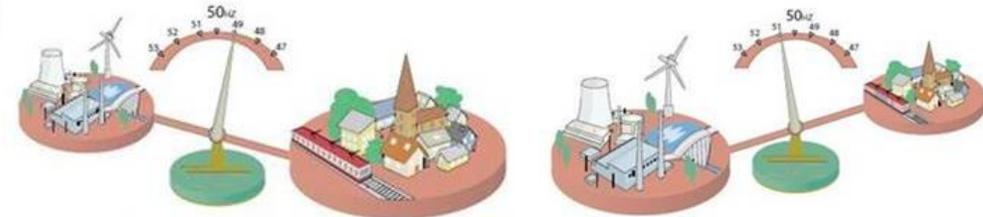


- C** *Autoconsommation*
- B + C** *Part de l'énergie produite consommée localement*
- C** *Autoproduction*
- A + C** *Part de l'énergie consommée produite localement*



10. Maximiser l'autoconsommation et/ou l'autoproduction
11. Alimentation de secours (UPS)
12. Arbitrage de l'énergie sur le marché SPOT
13. Gestion de la demande
14. Ecrêtage de puissance

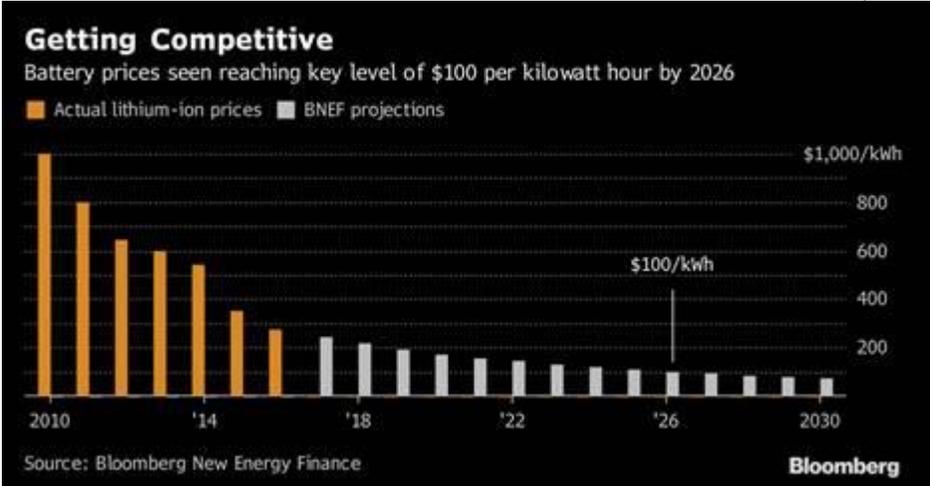
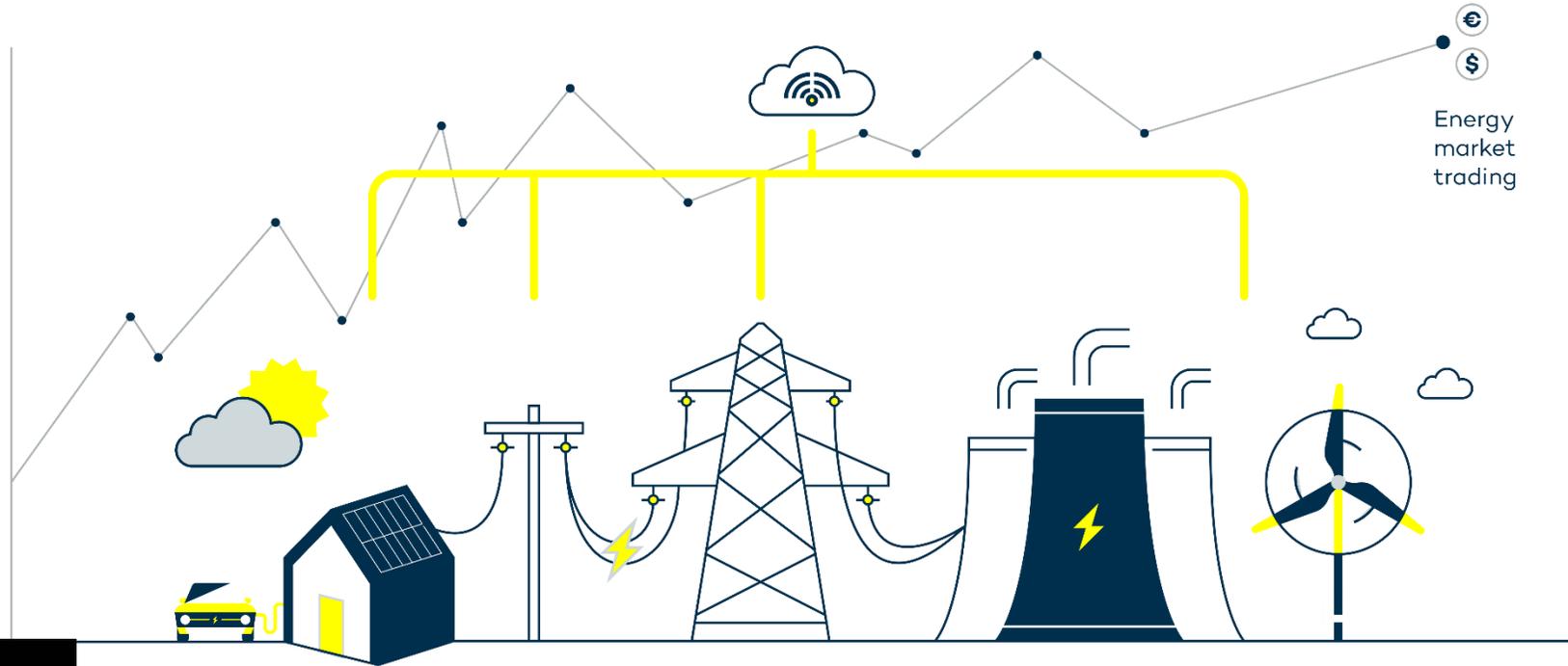
1. Régulation de fréquence: renforcée pour systèmes à faible inertie (< 1 sec), réserve primaire (< 30 sec) et réserve secondaire (< 2 min)
2. Régulation de tension
3. Réserve tertiaire (< 20 min)
4. Marché de capacité
5. Report d'investissement sur les réseaux transport et distribution d'électricité: traitement des congestions
6. Redémarrage réseau suite à un blackout (black start)



POSITIONNEMENT DE LA TECHNOLOGIE LI-ION → V2X



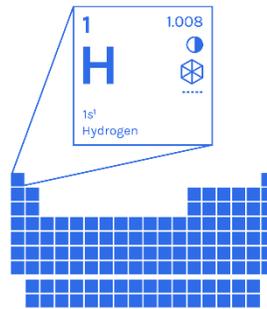
Prix des batteries Li-ion divisé par 5 en 10 ans !



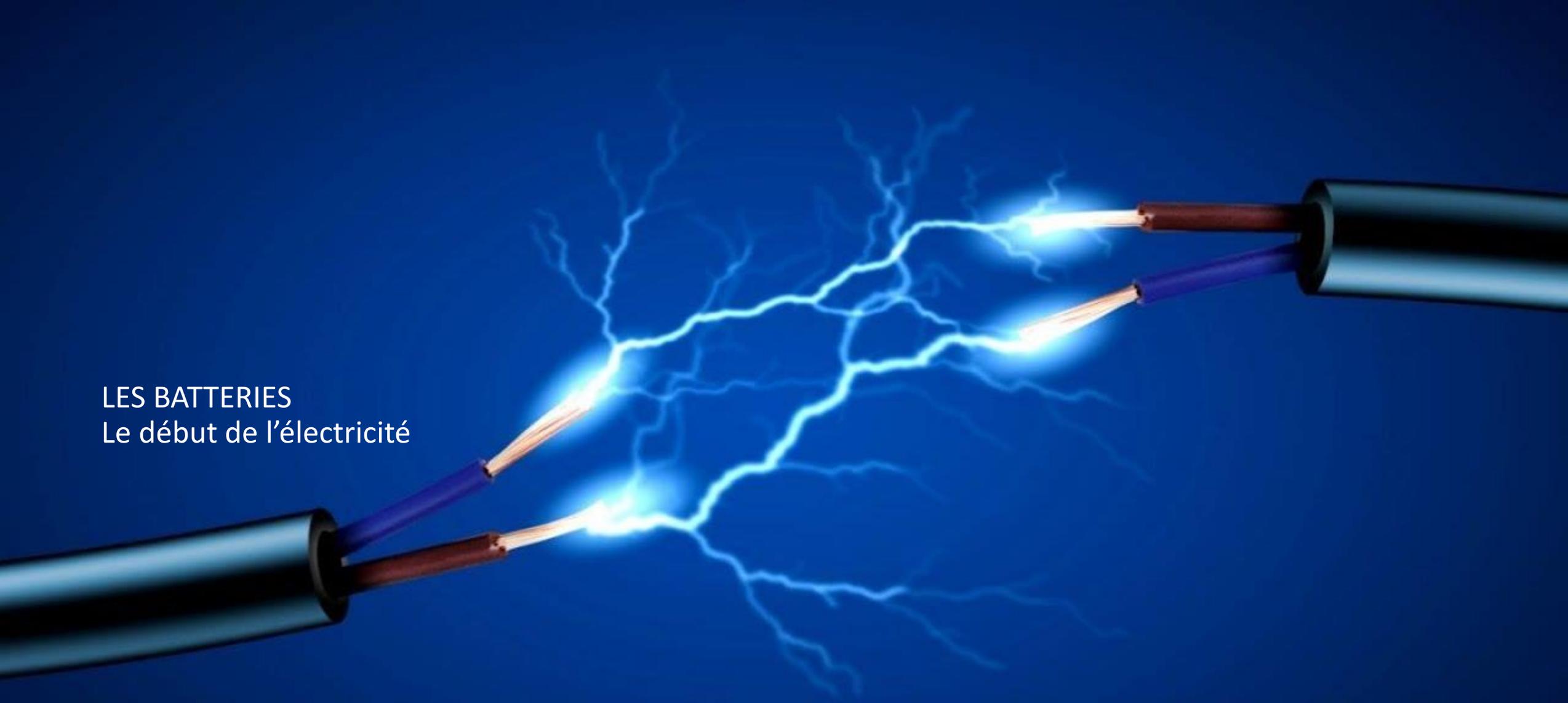
Energy consumption & Building level co-optimisation and control

DSO & TSO system balancing

Energy production



L'hydrogène est aussi en train de se faire une place dans ce marché !

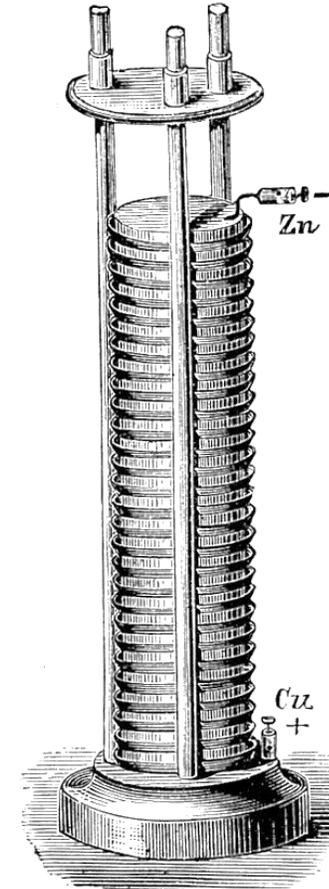


LES BATTERIES
Le début de l'électricité

AUX ORIGINES DE L'ÉLECTRICITÉ

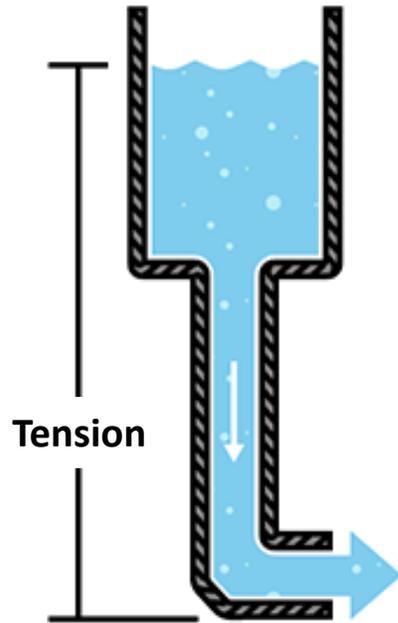


Alessandro Volta 1745-1827



La pile voltaïque 1800

LA TENSION OU FORCE ÉLECTROMOTRICE



La **tension** en électricité est équivalente à la **pression** de l'eau en hydraulique
Un château est quelque part l'équivalent hydraulique d'une batterie

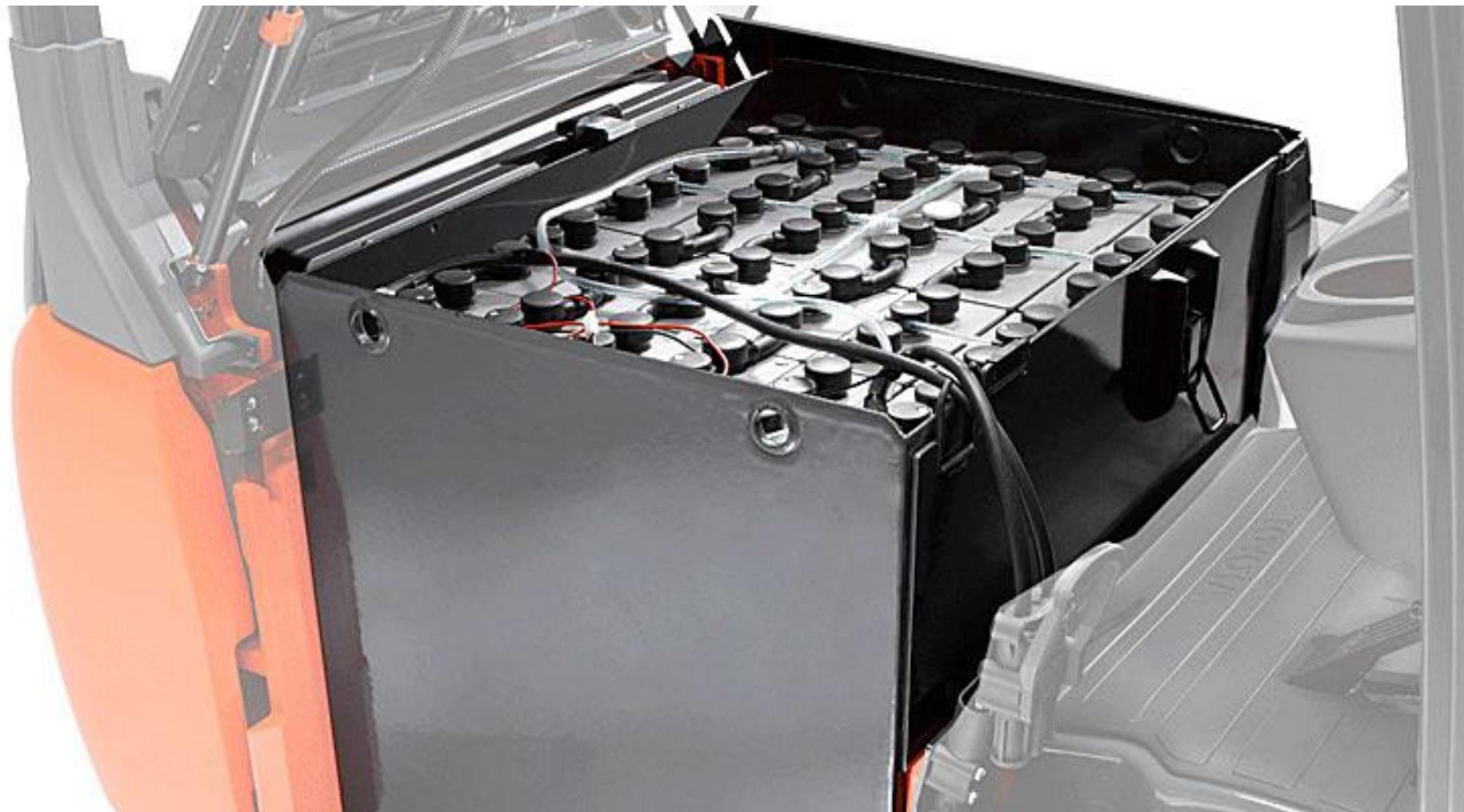
BATTERIE FAIBLE TENSION

1.5 V



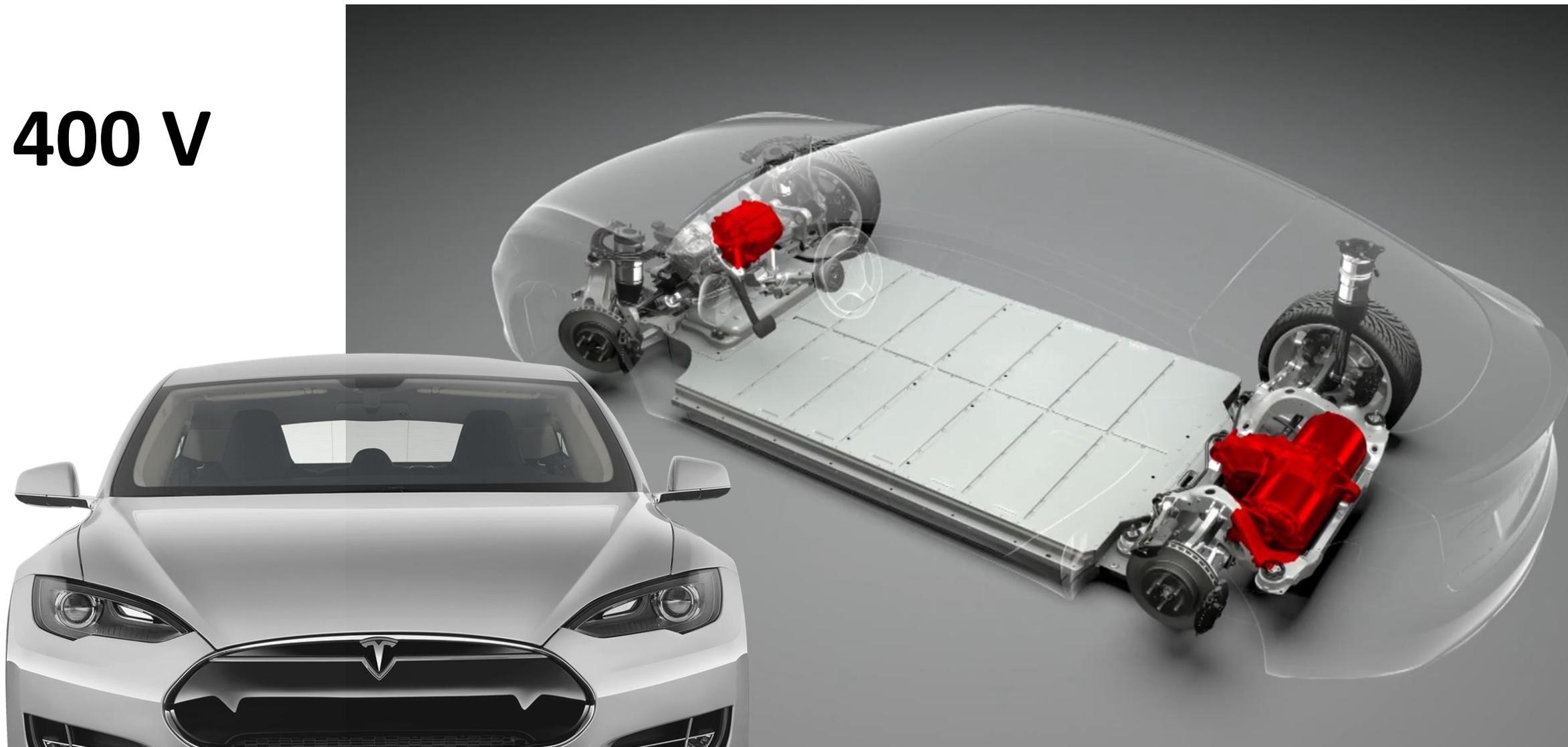
BATTERIE MOYENNE TENSION

48 V



BATTERIE HAUTE TENSION

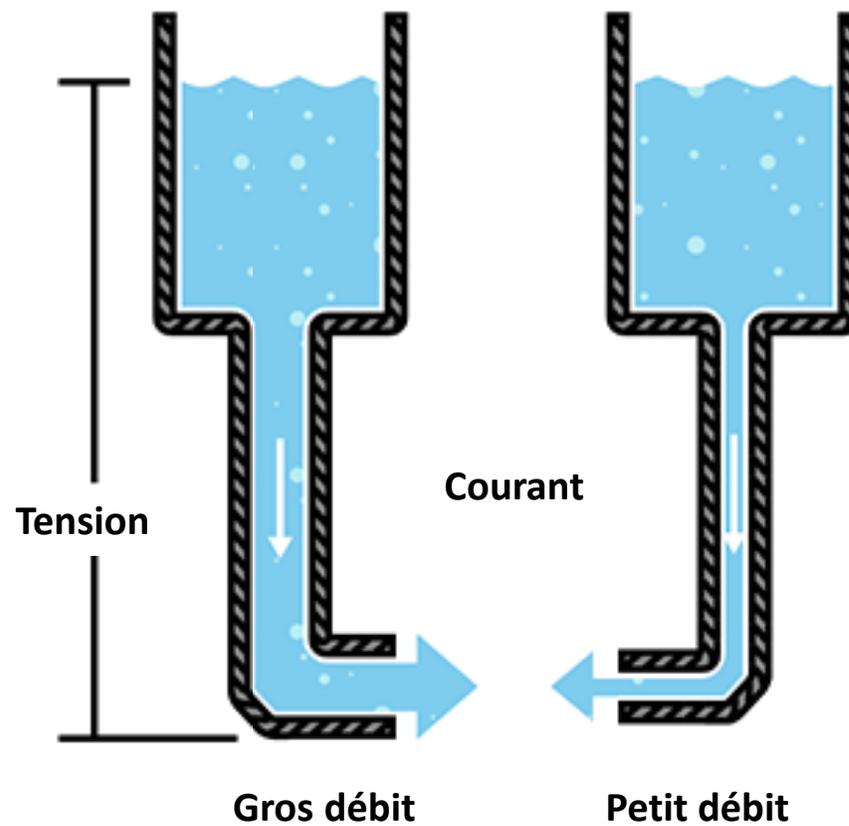
400 V



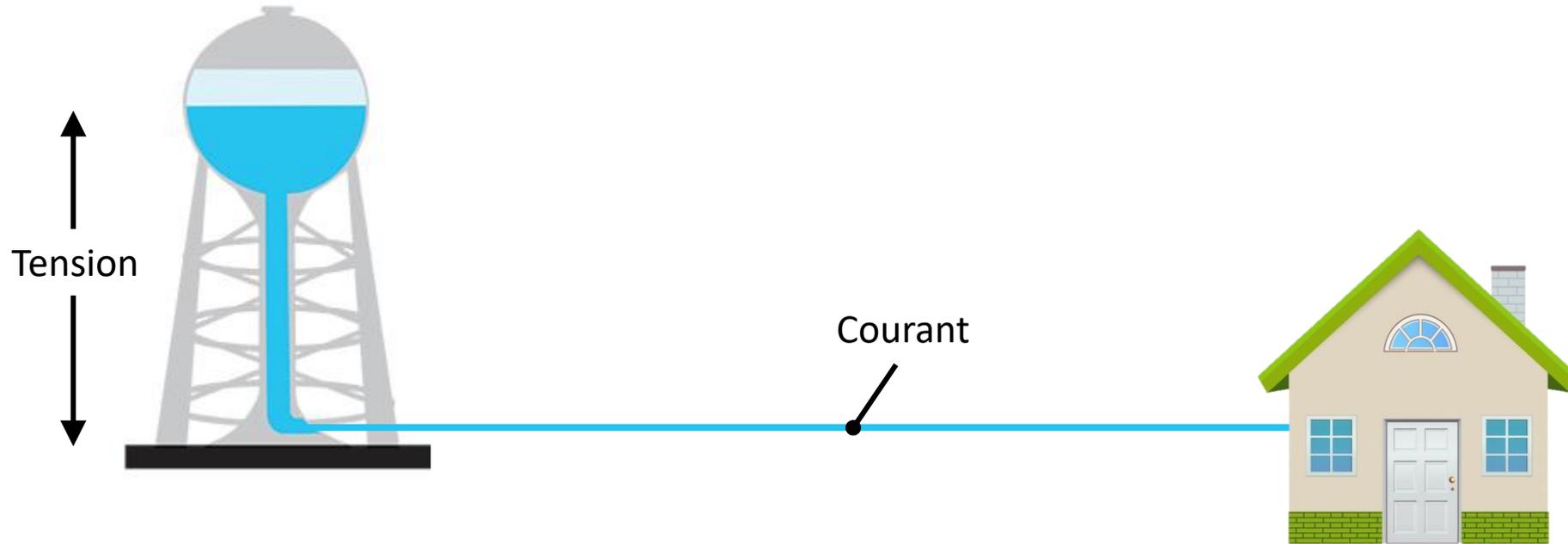
LE COURANT OU FLUX



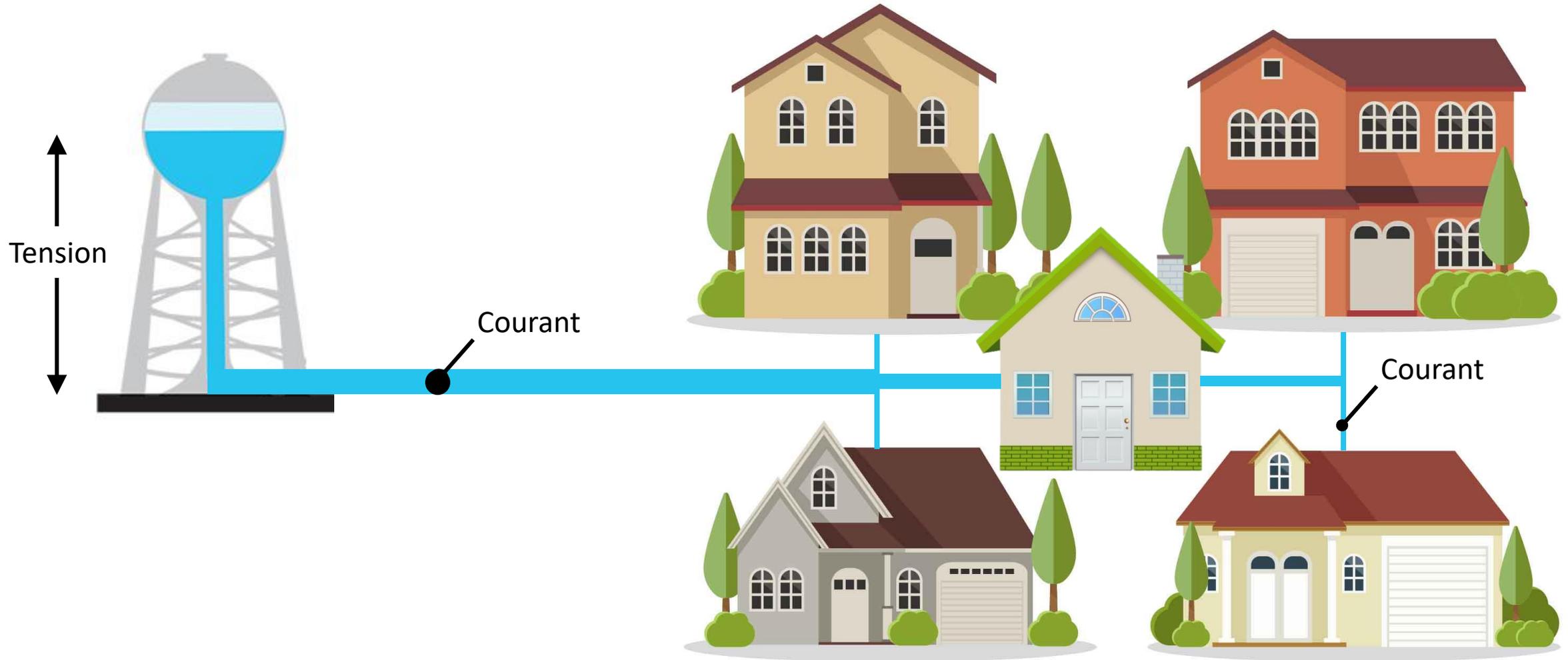
André-Marie Ampère
1775-1836



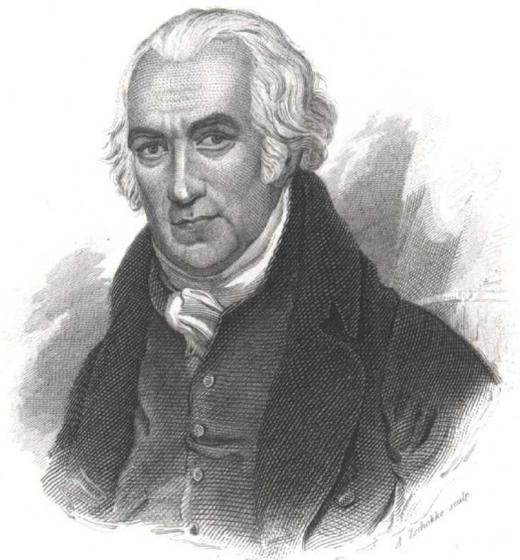
COURANT DE FAIBLE INTENSITÉ



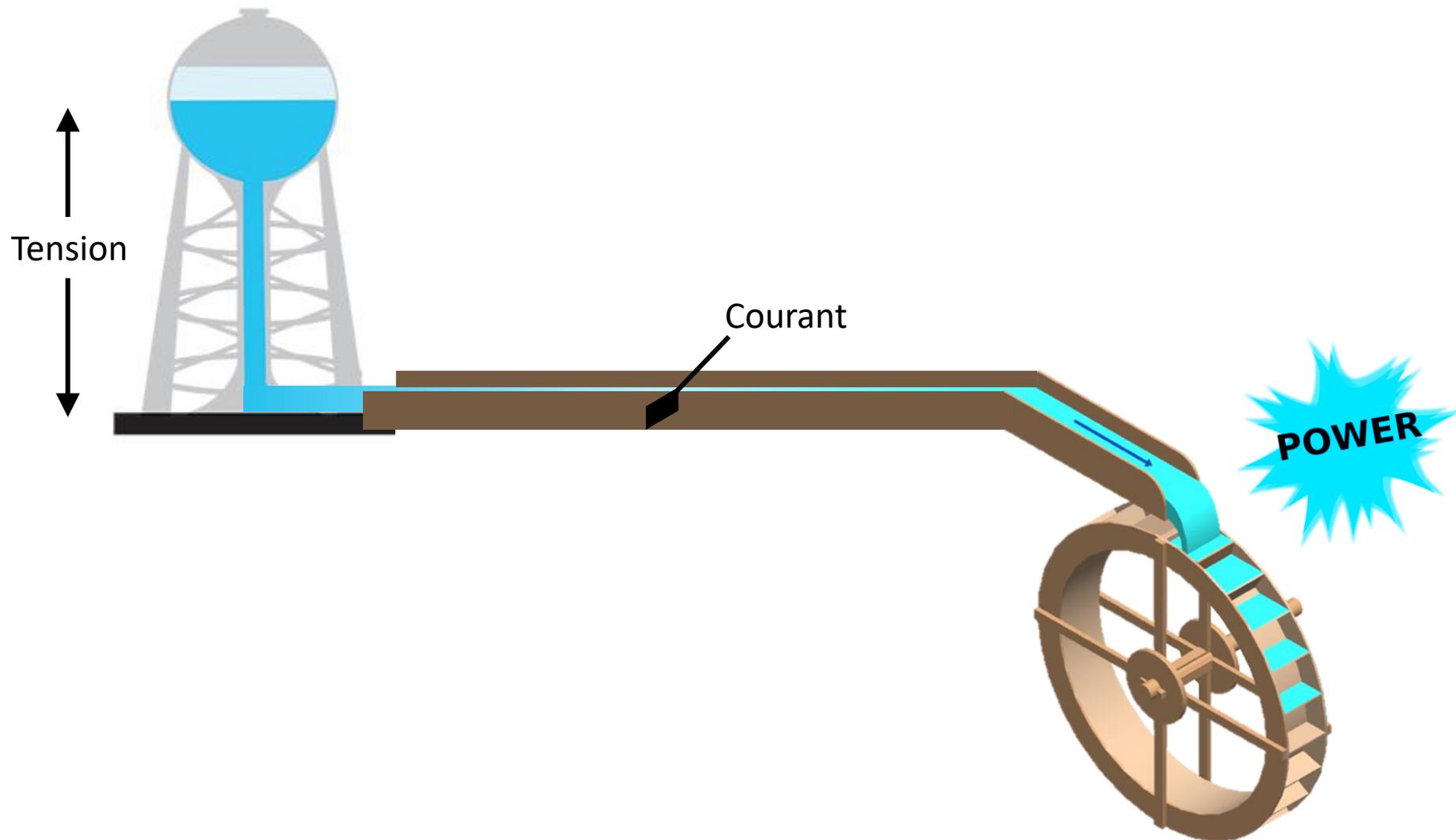
COURANT DE FORTE INTENSITÉ



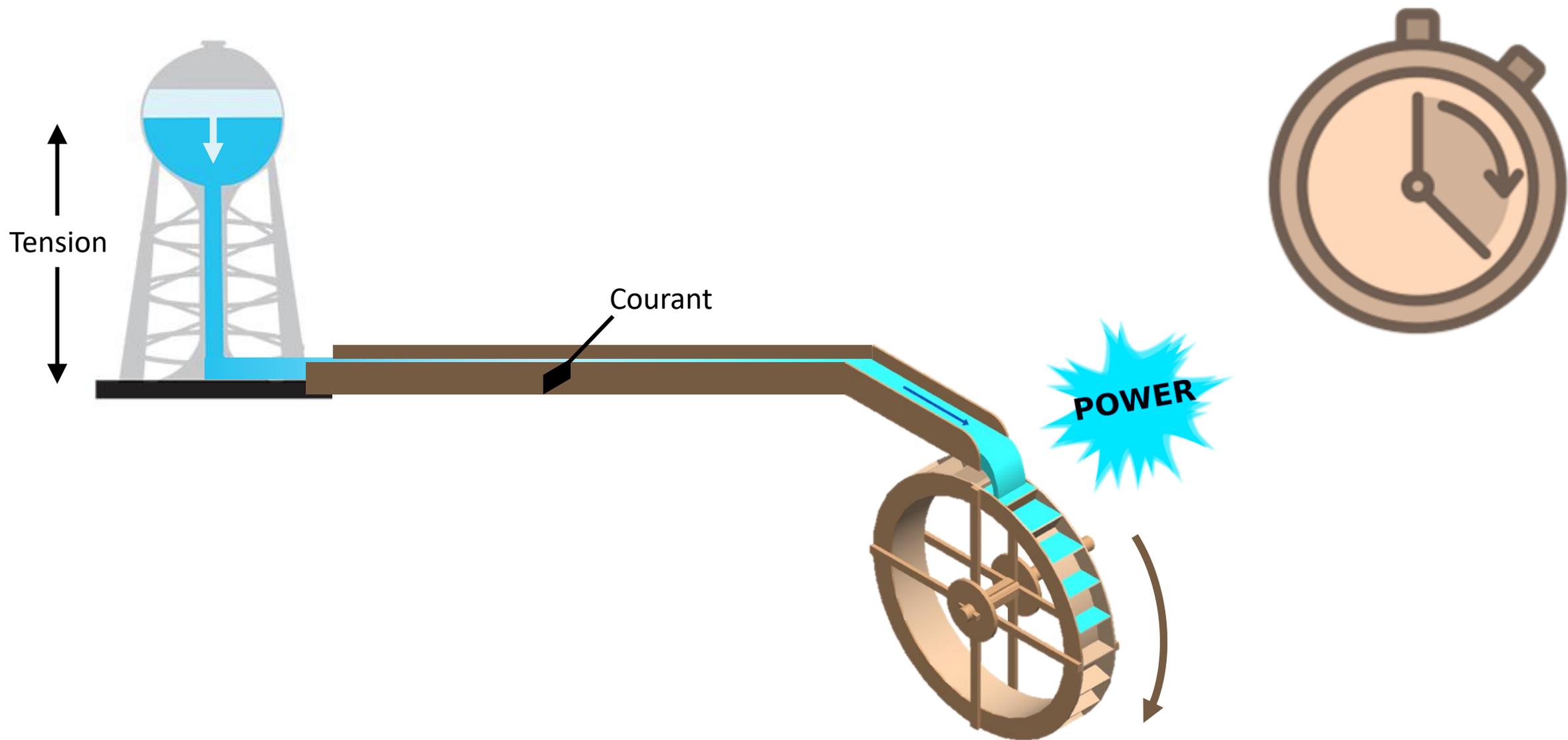
PUISSANCE OU PRODUIT DE LA TENSION ET DU COURANT



James Watt
1736-1819



ENERGIE OU PRODUIT DE LA PUISSANCE ET DU TEMPS





LES BATTERIES

Principes généraux

LA BATTERIE EST L'INDISPENSABLE ORGANE DE NOS NOMBREUX OBJETS SANS FIL



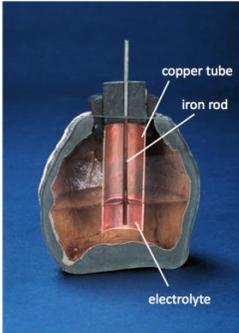
LES DÉBUTS DES BATTERIES

Primaires (non rechargeables)

A Baghdad Battery?

hydrogen formation at the copper (0 V)
 $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$
 iron dissolution at the rod (-0.44 V)
 $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$

Date to 250 BC - AD 224
 it is unknown if these were actually used as batteries



Pile de Bagdad (250 av-JC ??)



Alessandro Volta, Italie, 1800

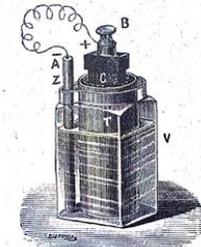
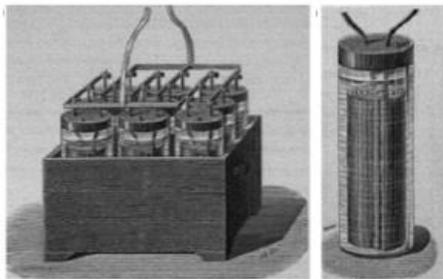


Fig. 133. — Pile Leclanché. — V, vase de verre renfermant une solution saturée de sel ammoniac; Z, cylindre de zinc amalgamé; T, vase poreux renfermant du bioxyde de manganèse (MnO₂); C, charbon de cornue.

Georges Leclanché, Belgique, 1867

Rechargeables



Batterie Pb-acide Faure (1890)



nickel-cadmium (Waldemar Jungner, 1899)



nickel-iron (Thomas Edison, 1901)

Rechargeable Lithium-Titanium Disulfide Cells

PRELIMINARY SPECIFICATION

TYPE LTS-90

NOMINAL VOLTAGE RANGE: 2.1-1.5 VOLTS

CELL CAPACITY:

100µA	90 mahr
1mA	70 mahr (1.3 V)

SEAL TYPE: HERMETIC (WELDED)

CELL IMPEDANCE: 7 ohms

CHARGE CURRENT:

CONTINUOUS	2 mA
INTERMITTENT	5 mA

CHARGE VOLTAGE:

MAXIMUM	2.8 V
CONTINUOUS (FLOAT)	2.1-2.3 V

CYCLE LIFE:

MINIMUM OF 5 CYCLES AT 1 mA TO 80% OF NOMINAL CAPACITY

SELF DISCHARGE:

BELOW 10% PER YEAR AT 25°C

THE LTS-90 CELL IS HERMETICALLY SEALED AND SPECIFICALLY ENGINEERED FOR APPLICATION IN MICRO ELECTRONIC CIRCUITS.

Battery

lithium / TiS₂ (Exxon, 1978)



nickel-metal hydride 1987



Li-ion (Sony Corp. 1991)

Quelques dates et évolutions...

LES GRANDES FAMILLES DE BATTERIES

- Batteries non rechargeables



- Ces batteries ne peuvent pas être facilement ou efficacement rechargées électriquement et sont donc déchargées puis jetées.
- La batterie non rechargeable, pratique, économique et légère, est généralement destinée aux applications portables domestiques.
- La plupart des batteries non rechargeables sont :
 - Cylindriques
 - Plates
 - Boutons

- Bonne durée de vie calendaire
- Haute densité d'énergie à faible régime de décharge
- Pas ou peu de maintenance
- Facilité d'utilisation

LES GRANDES FAMILLES DE BATTERIES

- Batteries rechargeables



- Stockeur d'énergie généralement connecté et chargé par une source d'énergie principale, elle délivre son énergie à la charge à la demande :
 - Automobiles (classiques et hybrides), avions, etc...
 - Alimentations de secours (UPS)
 - Stockage stationnaire pour le lissage des pointes de consommation du réseau électrique
- Déchargée comme une batterie non rechargeable mais rechargée après au lieu d'être jetée, elle offre une solution plus économique :
 - Appareils électroniques et outils électriques portables
 - Véhicules électriques
 - Applications requérant des régimes de décharge supérieurs à ceux des batterie non rechargeables

LE PRINCIPE GÉNÉRAL ?

En résumé, constituants essentiels de la cellule élémentaire :

Collecteur de courant négatif

Electrode négative

électrolyte/ séparateur

Electrode positive

Collecteur de courant positif

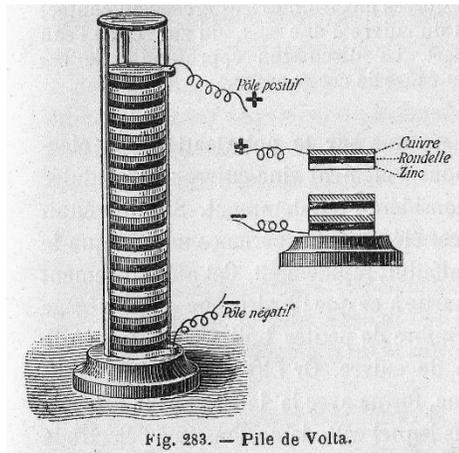
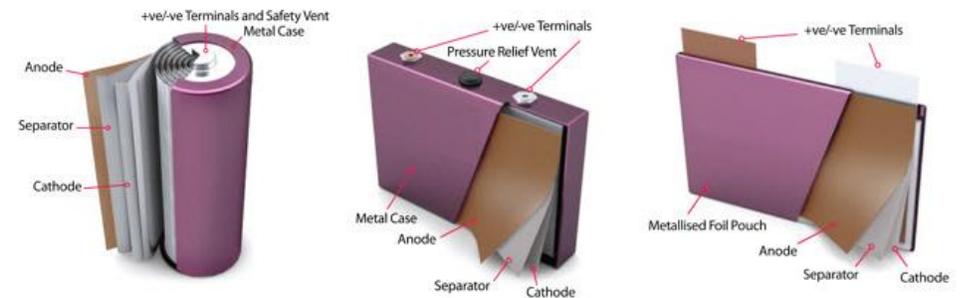
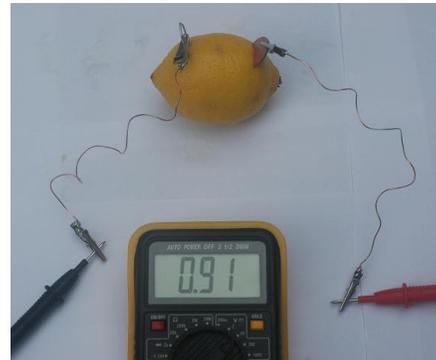
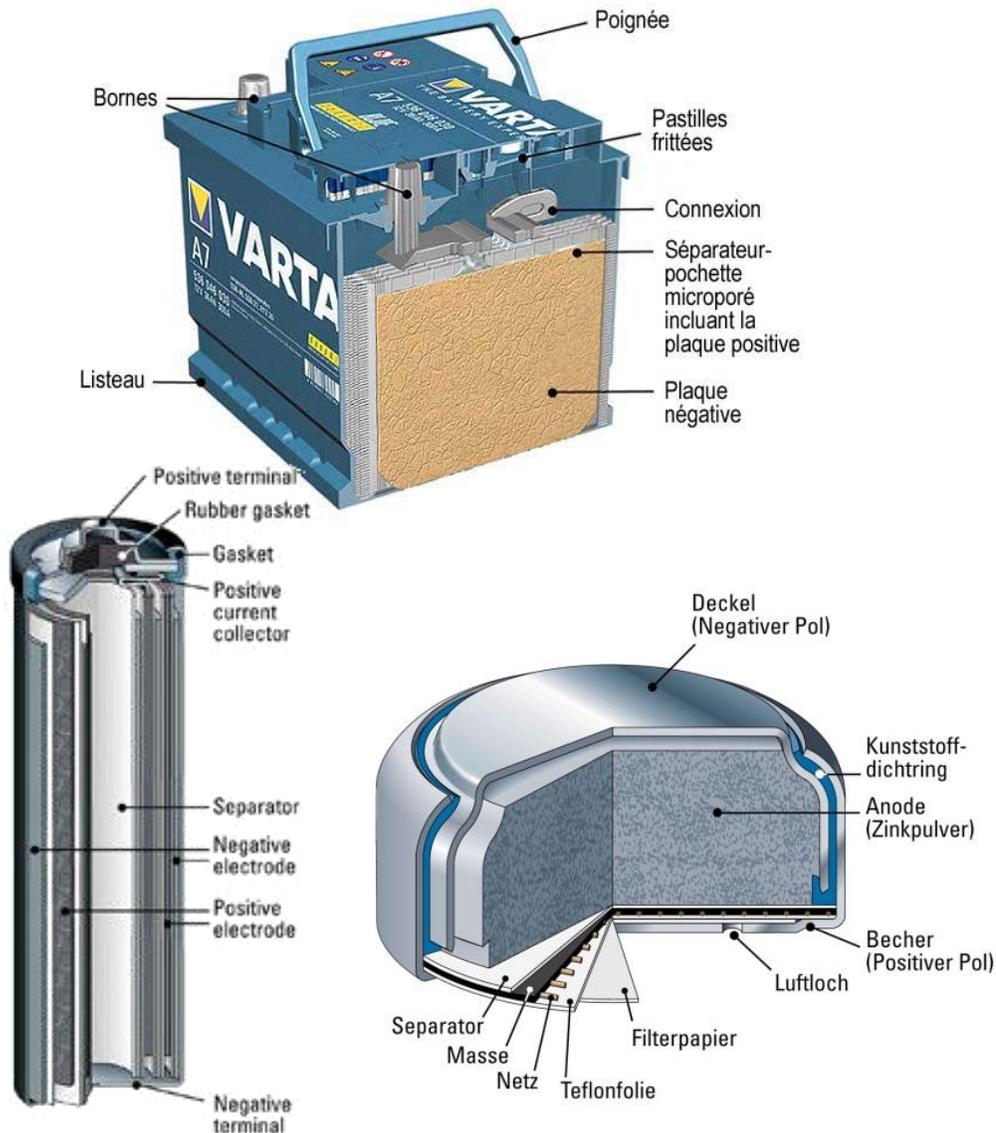


Fig. 283. — Pile de Volta.



AUTRES COMPOSANTS ET FORMES DE LA CELLULE



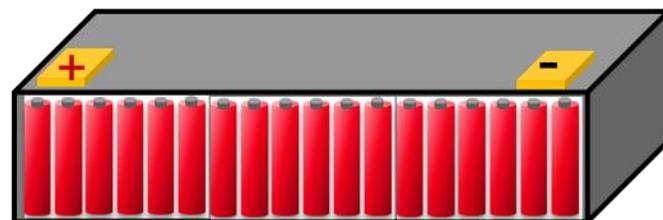
- La cellule peut être de différentes formes :
 - Cylindrique
 - Bouton
 - Plate
 - Prismatique
- Les composants de la cellule sont naturellement adaptés à sa forme.
- Les cellules sont scellées afin d'éviter les fuites et l'assèchement.
- Certaines cellules sont fournies avec des valves ou d'autres dispositifs permettant l'évacuation des gaz.
- Le conditionnement, les connectiques et les inscriptions constituent l'étape finale de la fabrication.

MAIS QUELS SONT LES CONSTITUANTS D'UNE BATTERIE ?

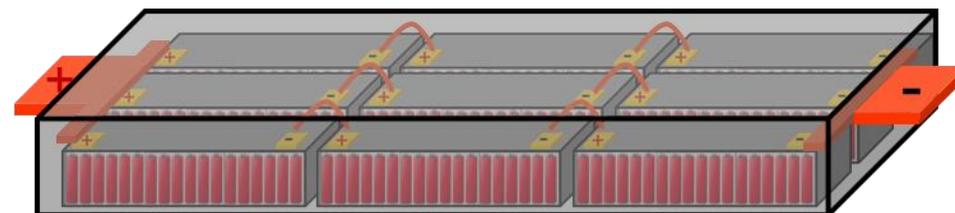
- Assemblage de cellules unitaires :



Cellule unitaire :
3,8 V – 3,15 Ah – 12 Wh – 45 g



Module de cellules: 6S14P (84 cellules)
22,8 V – 44 Ah – 1 kWh ~ 5 kg



Pack de modules : 3S3P (756 cellules)
68,4 V – 132 Ah – 9 kWh ~ 75 kg

- En pratique :



Téléphone
3,8 V, 3200 mAh, 54 g



Vélo électrique
36 V, 13,9 Ah, 2,7 kg



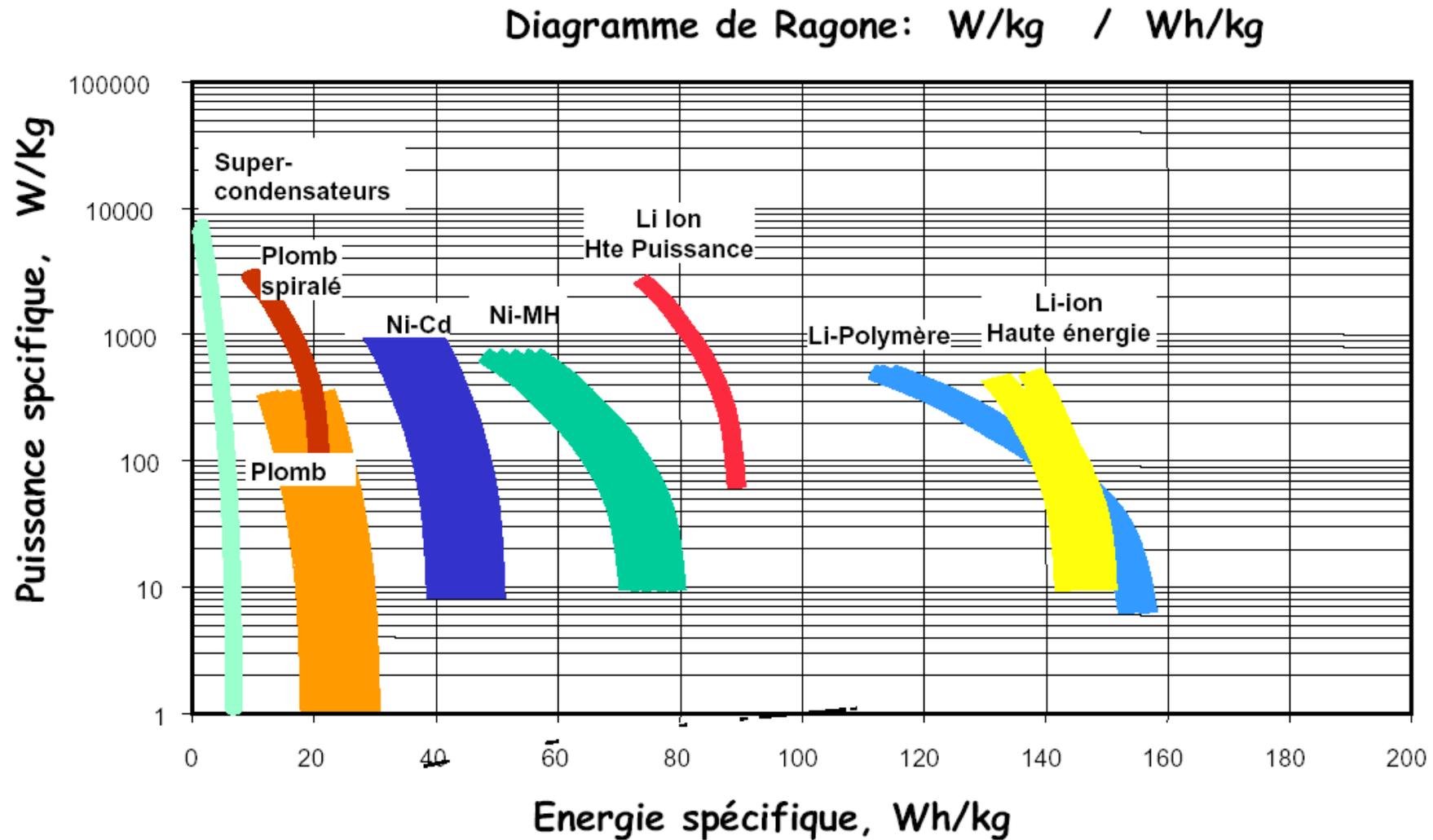
Zoé 400 V, 41 kWh, 12 modules, 192 cellules, 290 kg



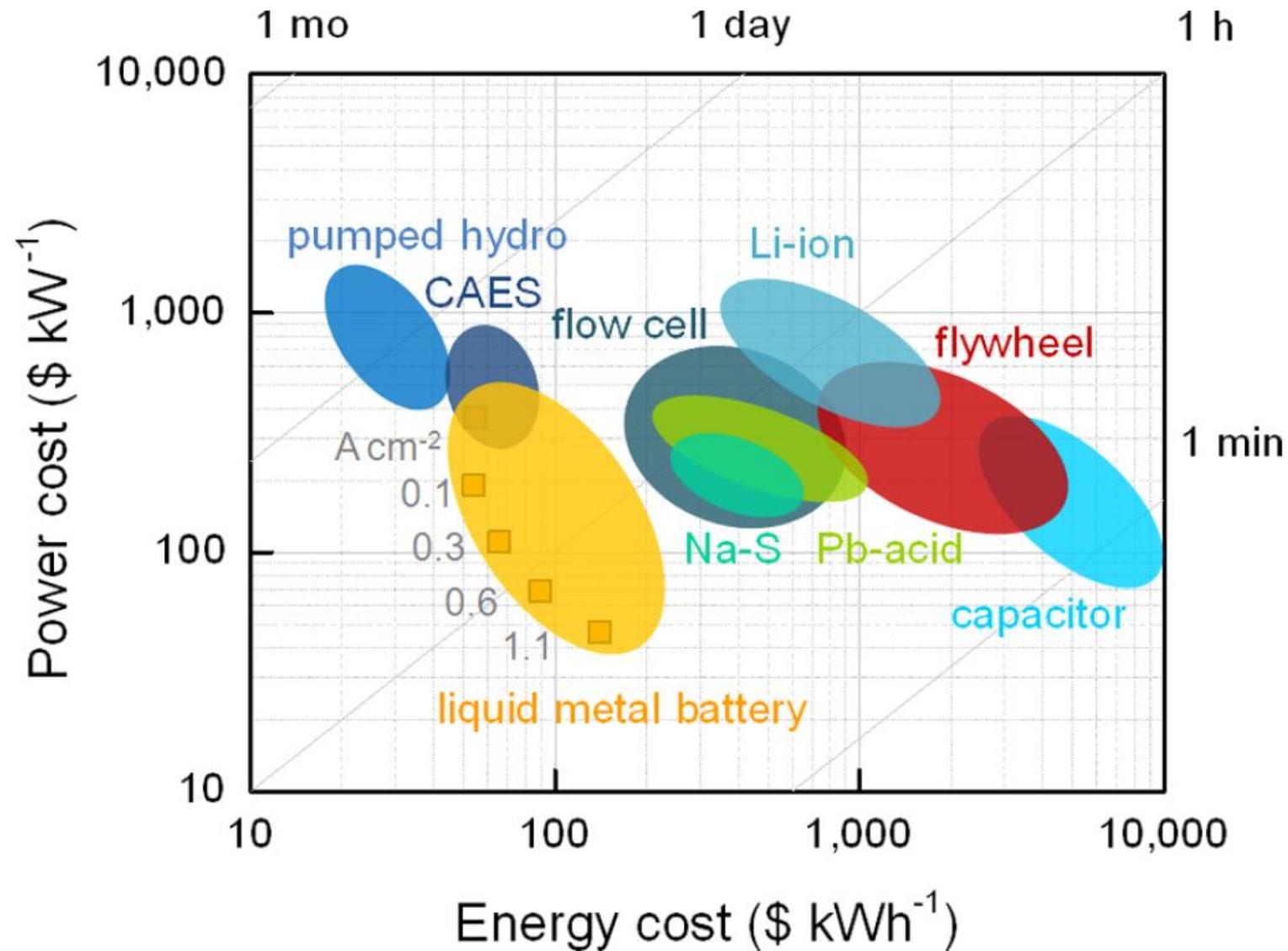
<http://kokam.com/container-2/>

Conteneur de stockage
640 -1100 V, 5,47 MWh dans container 40''

COMPROMIS ENTRE ÉNERGIE ET PUISSANCE



DES SOLUTIONS ... MAIS À QUEL COÛT ?



Source : H. Kim et al. "Liquid Metal Batteries: Past, Present, and Future" Chem. Rev. ACS Publications 2012 dx.doi.org/10.1021/cr300205k

LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE EST (TRÈS) ONÉREUX...



Stockage de l'énergie produite
par 1 h de fonctionnement d'une
éolienne de 2 MW.

Stockage de 2 MWh	Pb - acid	Li - ion	Na - S	VRB	Zn - air	H ₂
Masse (tonnes)	40 - 80	10 - 30	15 - 40	65 - 500	20 - 30	0.061
Volume (m ³)	20 - 40	4 - 40	15 - 20	80 - 200	10 - 33	0.3 *
Coût estimé (M€)	0.3 - 1.2	0.8 - 1.2	0.6 - 1	1 - 1.5	0.6 - 0.9	0.3

Le coût global de l'énergie stockée par des systèmes électrochimiques peut être très élevé (200 à 1000 €.MWh⁻¹), comparé à celui fourni par le réseau (159 €.MWh⁻¹ en France).

* à 700 bars

... il n'est généralement envisagé que s'il est indispensable.

Différentes chimies pour différentes applications, différentes performances !!



LES BATTERIES
Technologies

LES BATTERIES NON RECHARGEABLES

- Pile alcaline (pile saline = pile Leclanché)

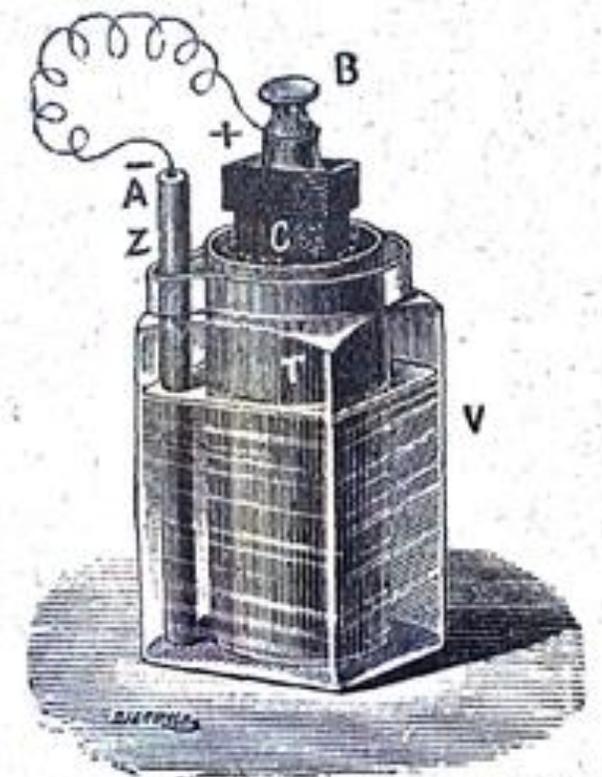
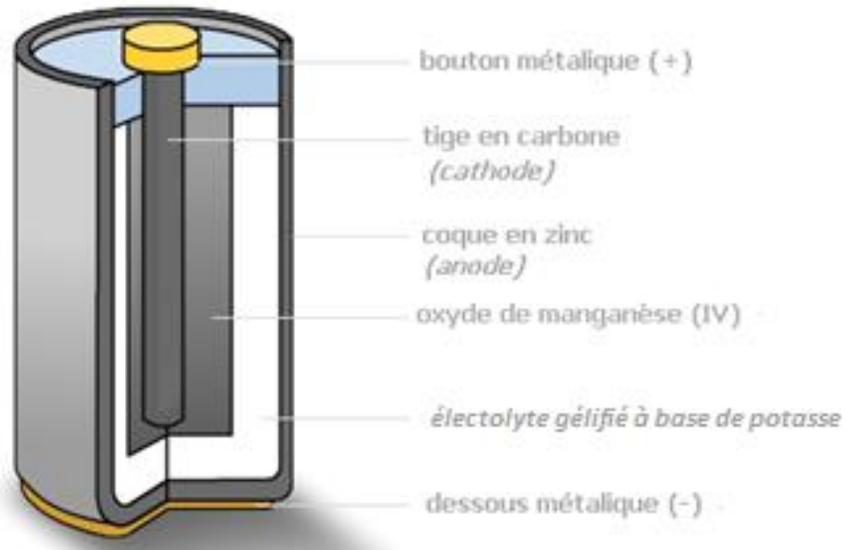
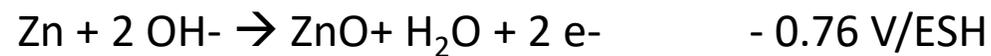


FIG. 153. — Pile Leclanché. — V, vase de verre renfermant une solution saturée de sel ammoniac; Z, cylindre de zinc amalgamé; T, vase poreux renfermant du bioxyde de manganèse (MnO_2); C, charbon de cornue.

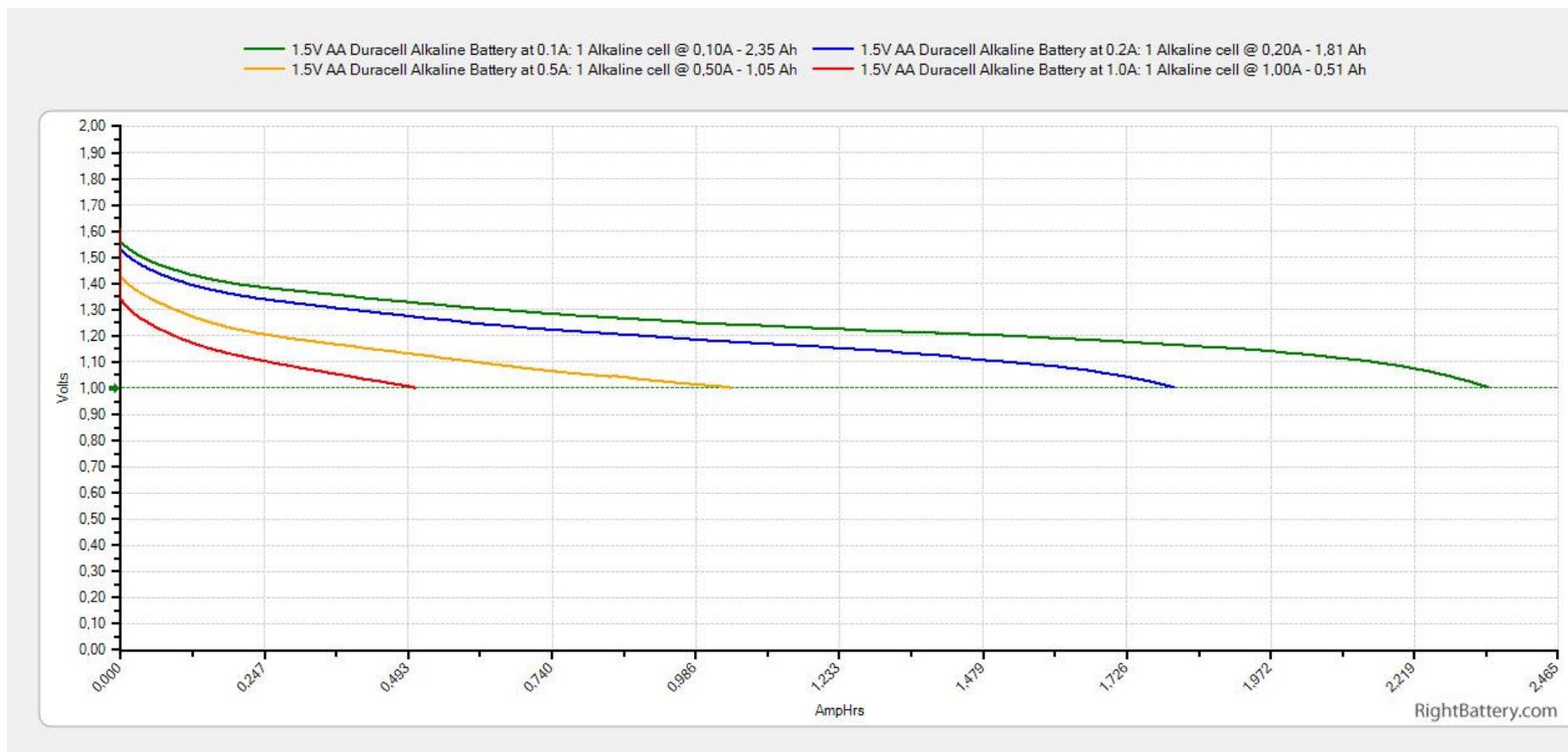


LES BATTERIES NON RECHARGEABLES

- Pile alcaline



<http://courses.carrefour.fr/drive/tous-les-rayons/piles-aa-lr-6-1-5v-duracell/PID1/1785159/1902065>



<http://rightbattery.com/118-1-5v-aa-duracell-alkaline-battery-tests/>

LES BATTERIES NON RECHARGEABLES

- Pile alcaline



7,50 €/ les 6 piles

<http://courses.carrefour.fr/drive/tous-les-rayons/piles-aa-lr-6-1-5v-duracell/PID1/1785159/1902065>

22 g format 14500

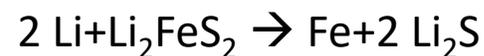
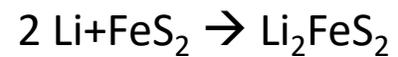
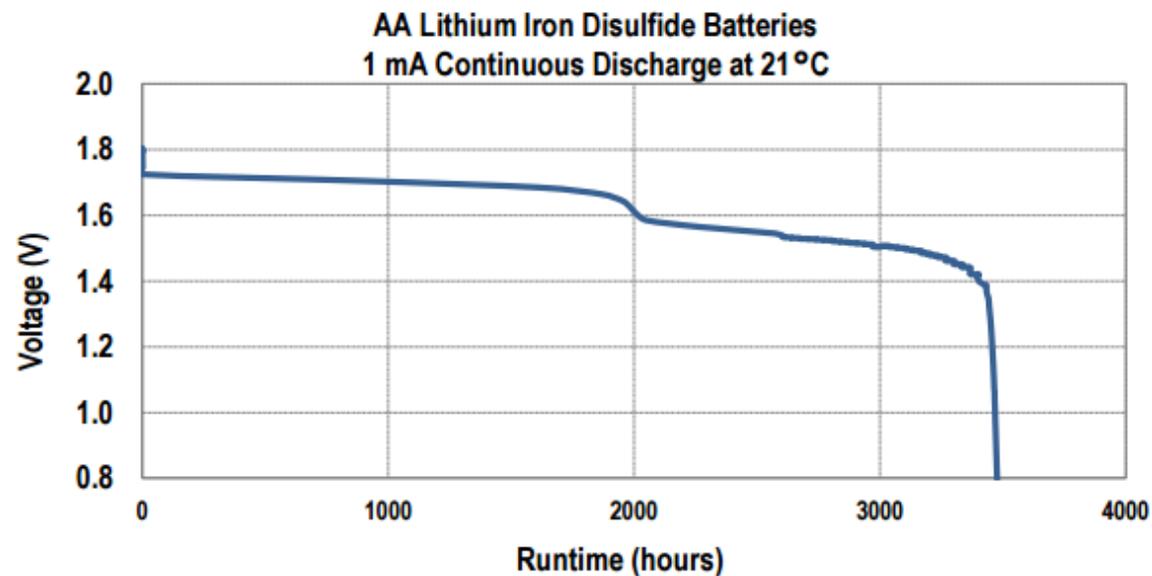
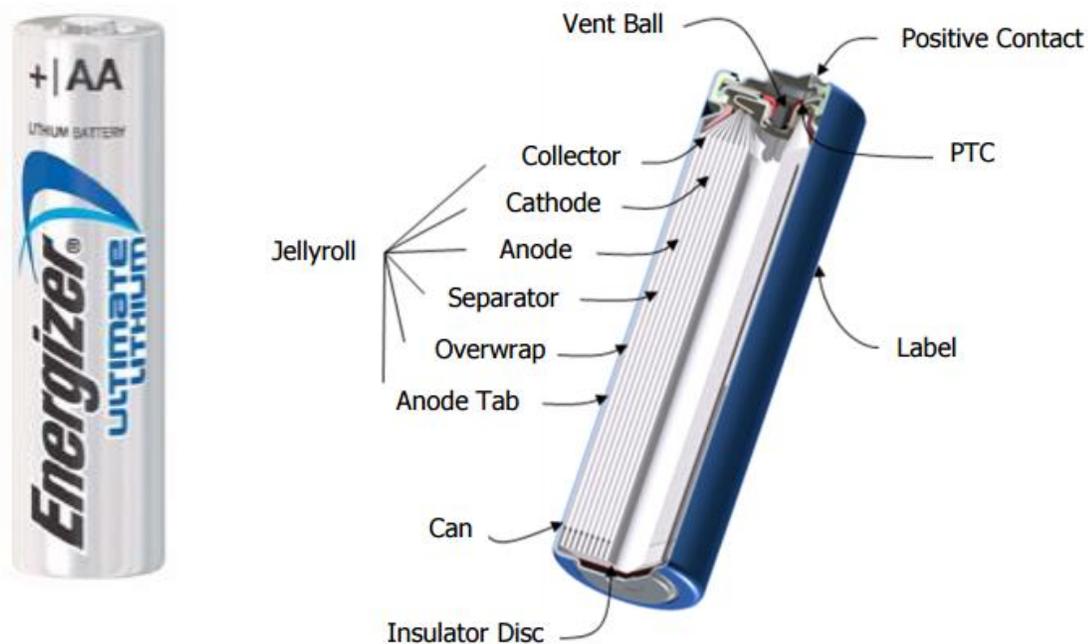
	0.1 A	0.2 A	0.5 A	1.0 A
Capacité (mAh)	2348	1800	1000	506
Energie (Wh)	2.913	2.189	1.194	0.564
Prix (€/Wh)	0.43 €	0.57 €	1.05 €	2.22 €
Densité mass. (Wh/kg)	132	100	54	26
Densité vol. (Wh/l)	424	319	174	82

<http://rightbattery.com/118-1-5v-aa-duracell-alkaline-battery-tests/>

	Alcaline Zn/MnO ₂
Tension	1,5 V (1,6 – 0,75 V)
Autodécharge à 40°C	10 – 15% /an

LES BATTERIES NON RECHARGEABLES

- Pile Lithium métal - pyrite (Li-FeS₂)



http://data.energizer.com/PDFs/LithiumL91192_XSection.pdf

LES BATTERIES NON RECHARGEABLES

- Pile Lithium métal - pyrite (Li-FeS₂)



15 g format 14500

<http://www.leroymerlin.fr/v3/p/produits/lot-de-4-piles-lithium-lr06-aa-1-5-v-energizer-e176678#&xtmc=pile&xtcr=91>

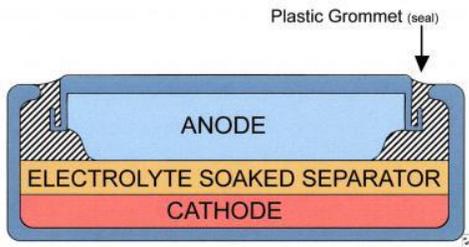
	0.1 A	1.0 A	3.0 A
Capacité (mAh)	3100	3000	2500
Energie (Wh)	4.5	3.8	2.8
Prix (€/Wh)	0.94 €	1.11 €	1.51 €
Densité mass. (Wh/kg)	300	253	187
Densité vol. (Wh/l)	664	560	413

<http://lygte-info.dk/info/ComparisonOfAABatteryChemistry%20UK.html>

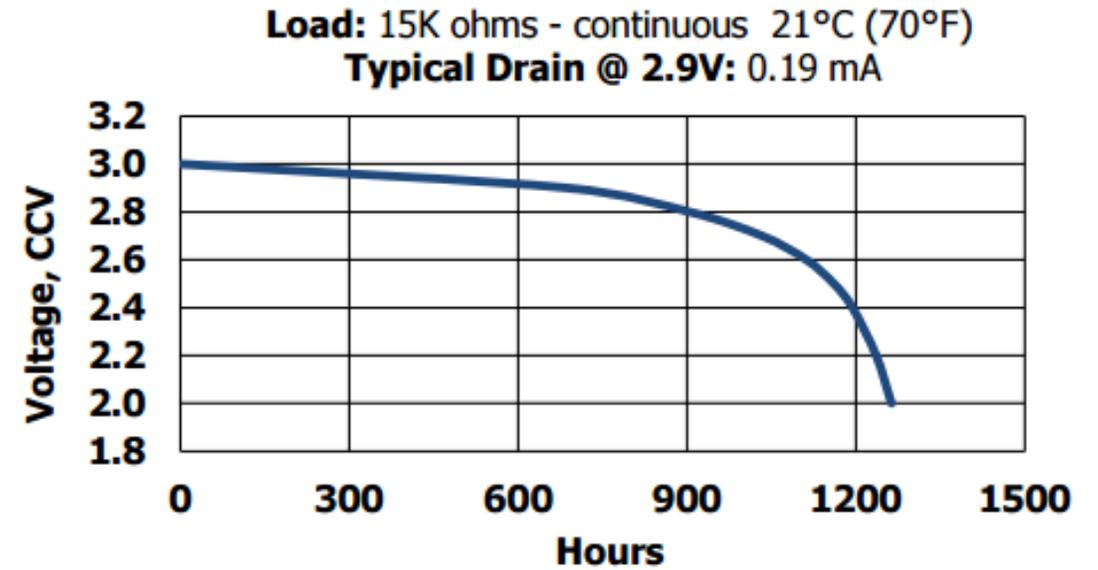
	Li / FeS ₂
Tension	1,5 (1,6 – 1,2V)
Autodécharge à 40°C	3 % / an

LES BATTERIES NON RECHARGEABLES

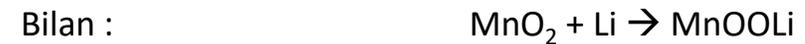
- Pile “bouton”, exemple Li /MnO₂



https://en.wikipedia.org/wiki/File:CR2032_disassembled.jpg



<http://data.energizer.com/PDFs/cr2032.pdf>



LES BATTERIES NON RECHARGEABLES

- Les piles Lithium (montre, télécommande, jeux, jouets...)
 - Le risque peut être à la maison : « **Isère : une petite fille meurt un an après avoir avalé une pile au lithium** » 28 juillet 2017

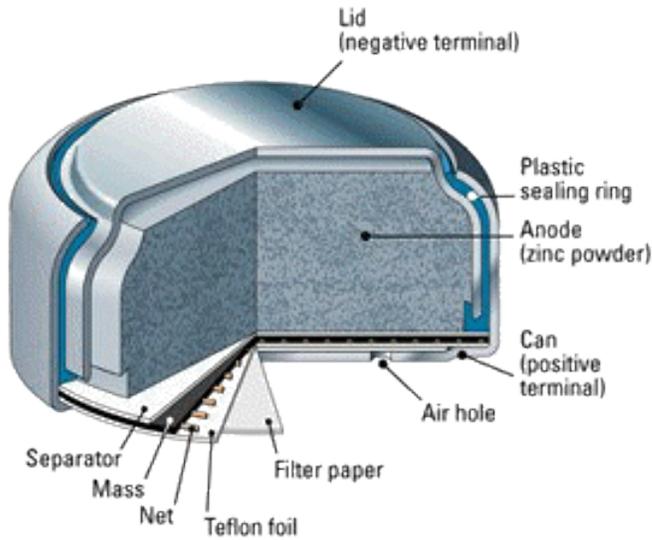
L'enfant de trois ans a subi un trentaine d'interventions chirurgicales mais n'a pas pu être sauvé.

http://www.francetvinfo.fr/faits-divers/isere-une-fillette-meurt-un-an-apres-avoir-avale-une-pile-au-lithium_2304263.html



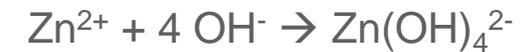
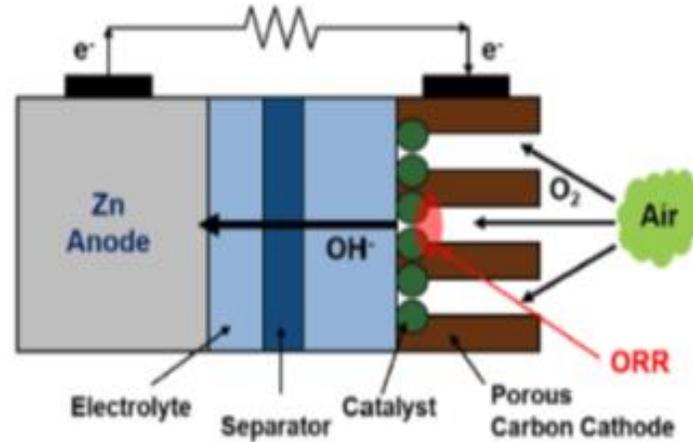
LES BATTERIES NON RECHARGEABLES

- Zn - air



Zinc air button cell

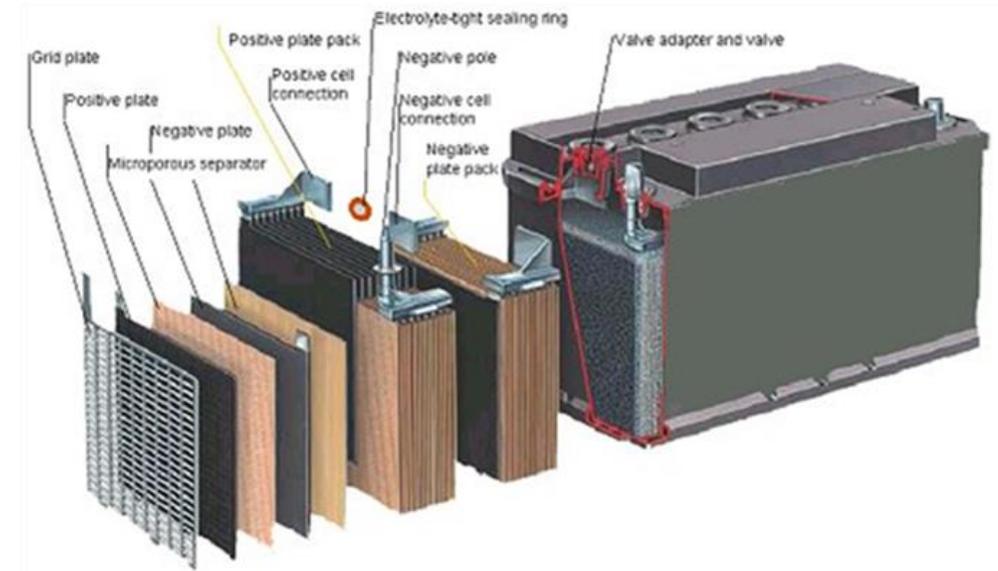
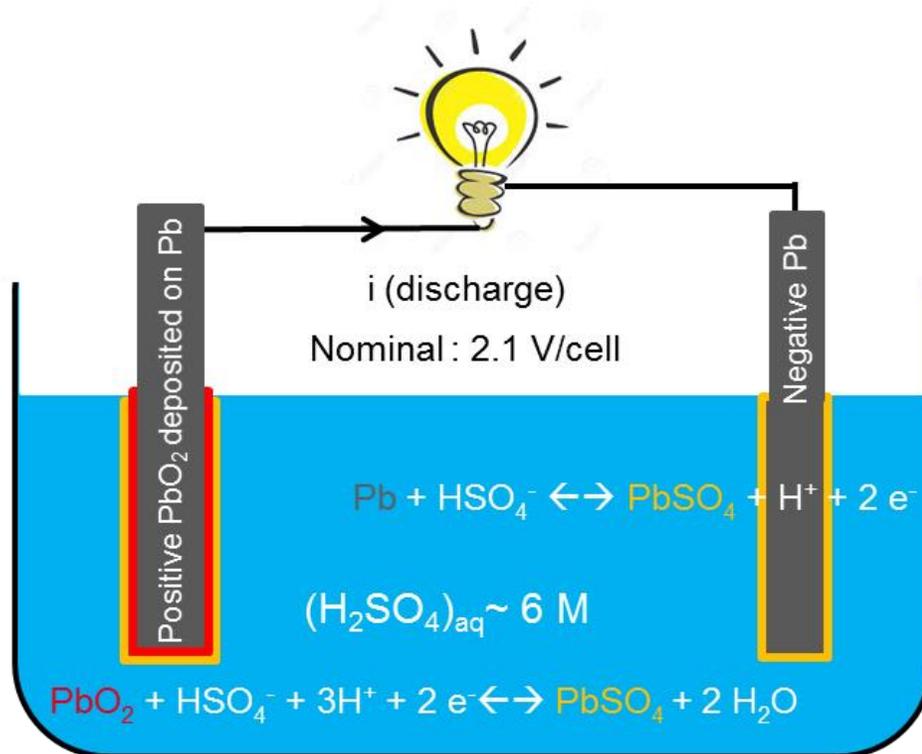
<http://www.batteryfacts.co.uk/BatteryTypes/HearingAidBatteries.html>



LES BATTERIES RECHARGEABLES

- Batteries plomb - acide

- Principe



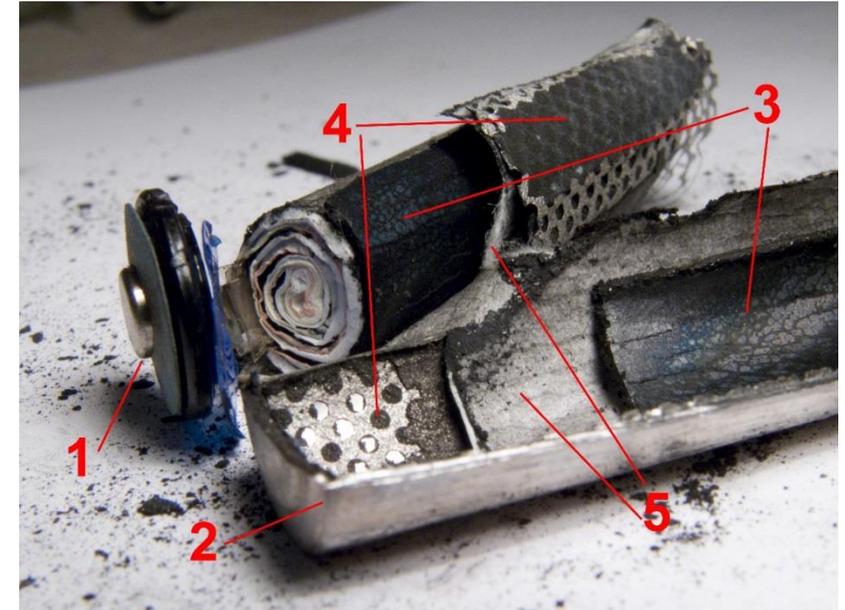
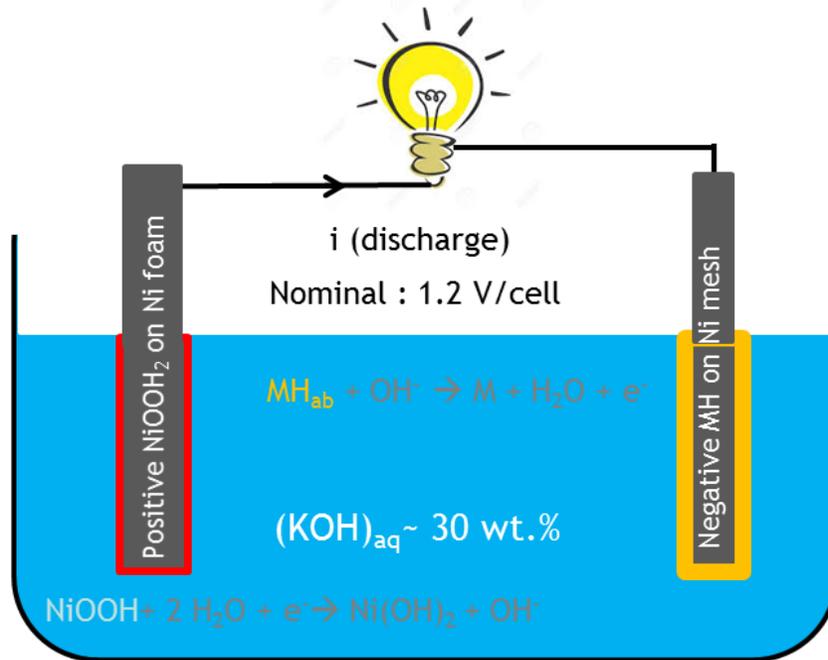
LES BATTERIES RECHARGEABLES

- Batteries Ni – MH

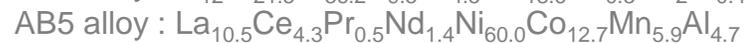
– Principe



(M = AB5-type, LaNi_5 or AB2)



- 1 - Positive terminal
- 2 - Outer metal casing (also negative terminal)
- 3 - Positive electrode
- 4 - Negative electrode with current collector (metal grid, connected to metal casing)
- 5 - Separator (between electrodes)



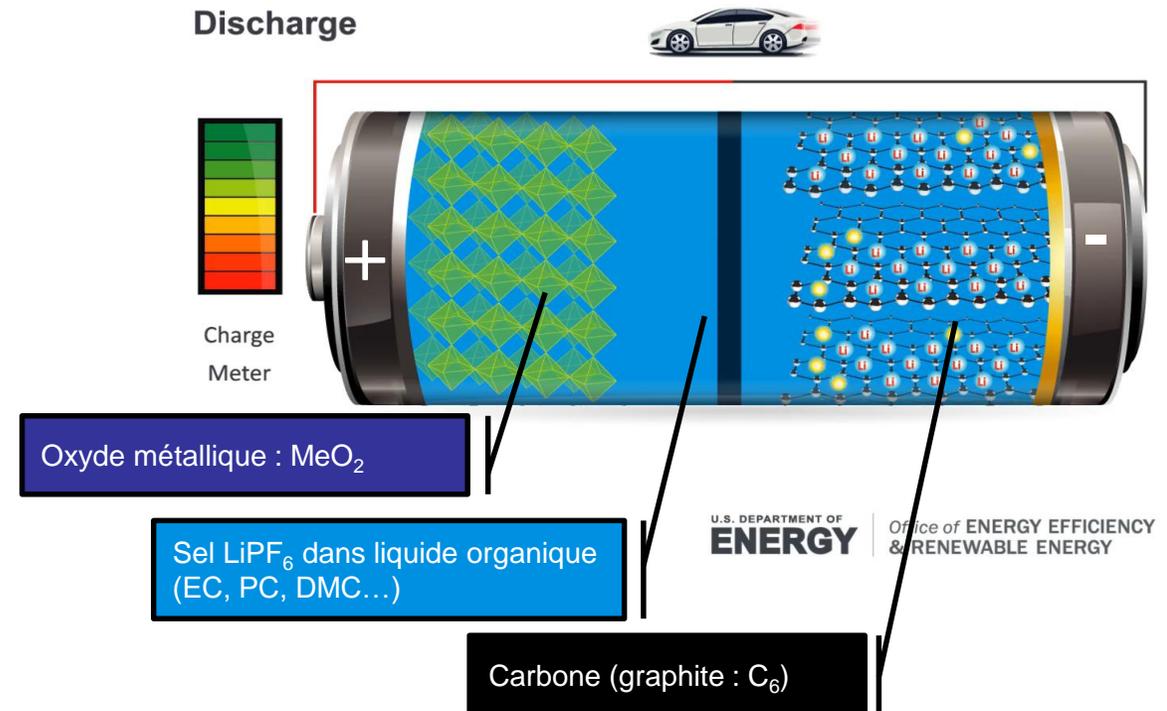
https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93metal_hydride_battery

LES BATTERIES RECHARGEABLES

- **Batteries Li-ion** : utilisation de composés d'insertions
 - Structures cristallines dans lesquelles de petits ions (Li^+) peuvent s'insérer.
 - Transport des ions d'une électrode à l'autre (réversible)



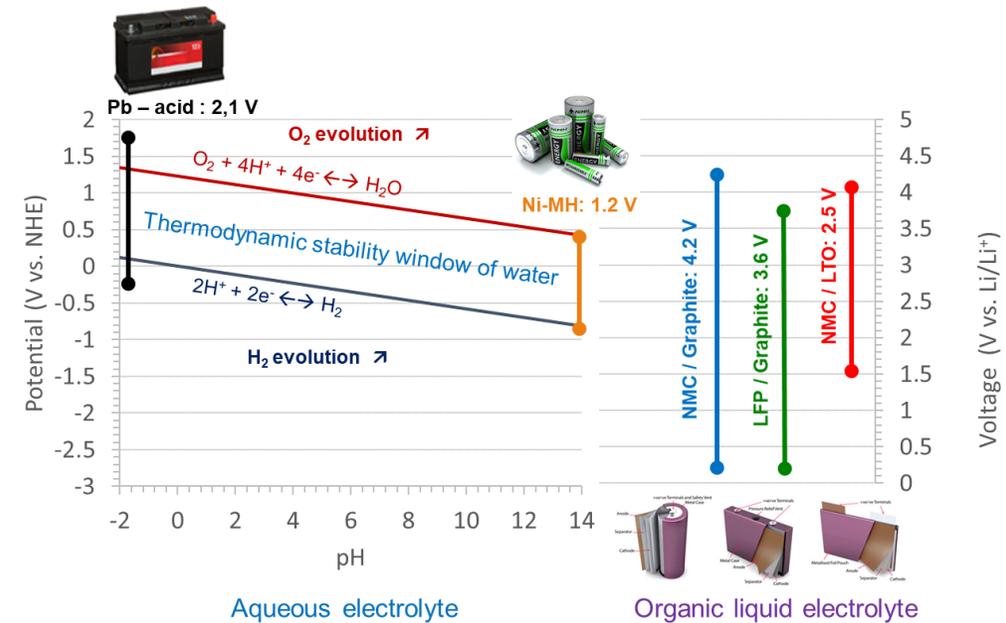
How Lithium-ion Batteries Work



LES BATTERIES RECHARGEABLES

- Batteries Li-ion : électrolyte organique
 - Sel de lithium (LiPF_6) dans un solvant organique (carbonates)
 - **Électrolyte aqueux : 1,3 – 2 V/cellule maximum**
 - **Électrolyte organique : 4,2 V/ cellule maximum**

Énergie
X 3



↳ Tension de cellule élevée → forte densité d'énergie

	Li-ion	Pb-acide	Ni-MH
Wh/kg	200 – 270	20 – 50	40 - 80
Wh/L	400 - 600	60 – 100	80 – 150

QUESTION

