

L'ACCÉLÉRATION DES TRANSITIONS ÉNERGÉTIQUES AU NORD ET AU SUD

**1. DES AVANCÉES TECHNOLOGIQUES QUI BOUSCULENT
LES ÉCONOMIES DÉVELOPPÉES ET CELLES EN DÉVELOPPEMENT**

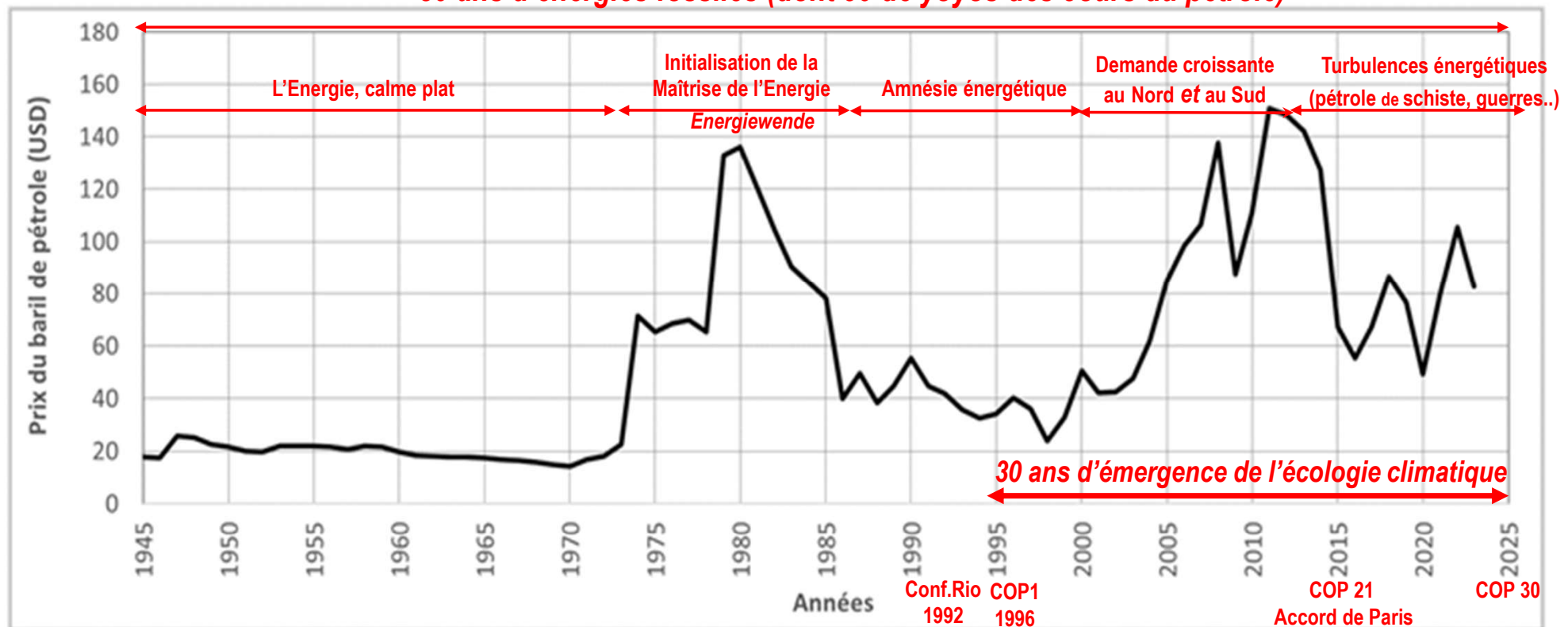
**2. LA TRANSFORMATION DES RÉSEAUX POUR TENDRE VERS
DES MIX ÉLECTRIQUES 100% RENOUVELABLES D'ICI 2035-2050**

* ELLA = Association « Energie Loire Layon Aubance »
ERCLLA = SAS « Energies Renouvelables Citoyennes Loire Layon Aubance »

Christian de Gromard
degromardc@gmail.com
ELLA / ERCLLA *
Rablay - 12 12 2025

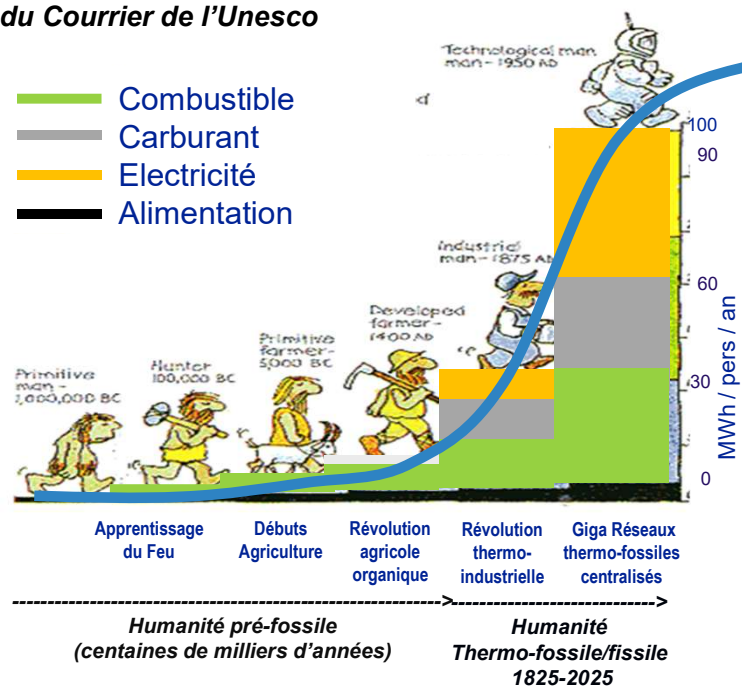
Quelles énergies déployer dans un monde de turbulences énergétiques ?

80 ans d'énergies fossiles (dont 50 de yoyos des cours du pétrole)



Depuis deux siècles, l'énergie génère de la croissance ... mais sur des bases insoutenables et inéquitables

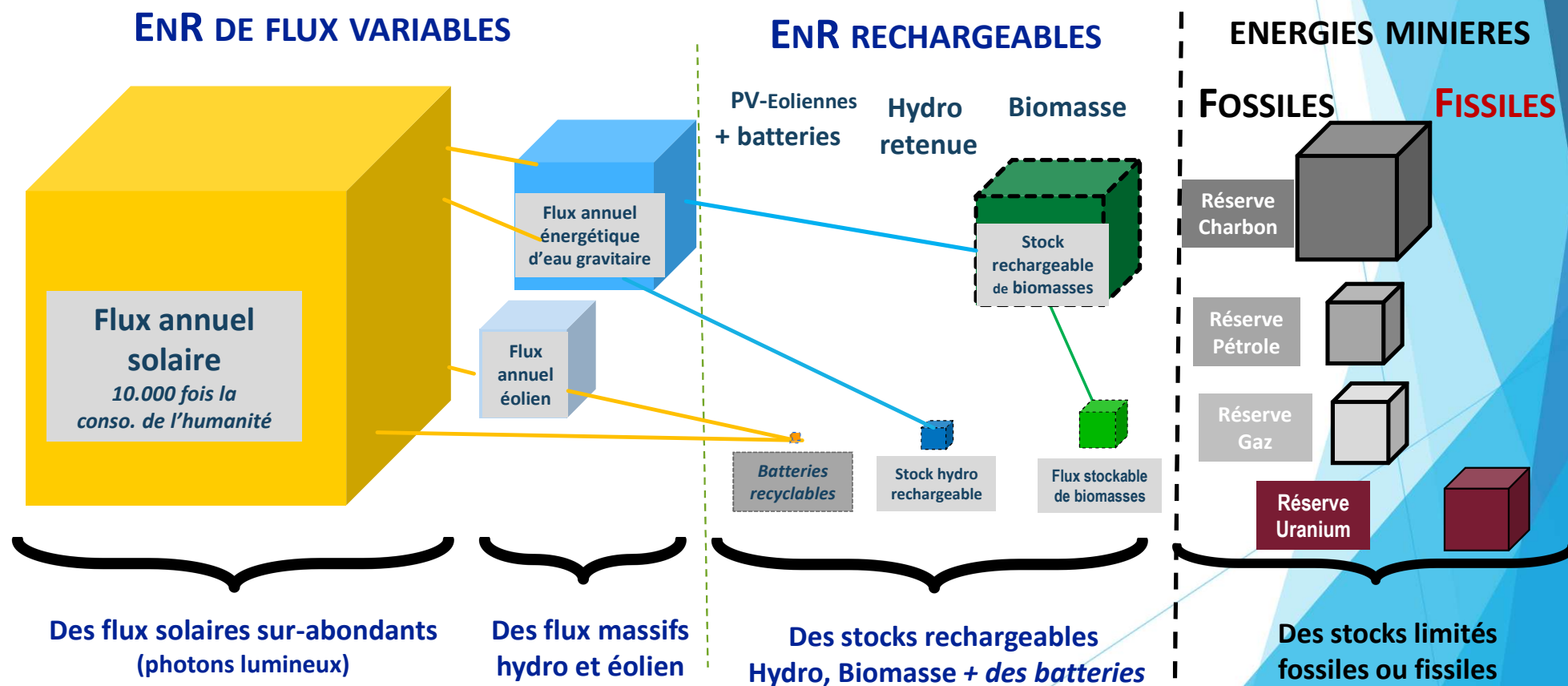
adapté du *Courrier de l'Unesco*



....Solutions et trajectoires à venir ?

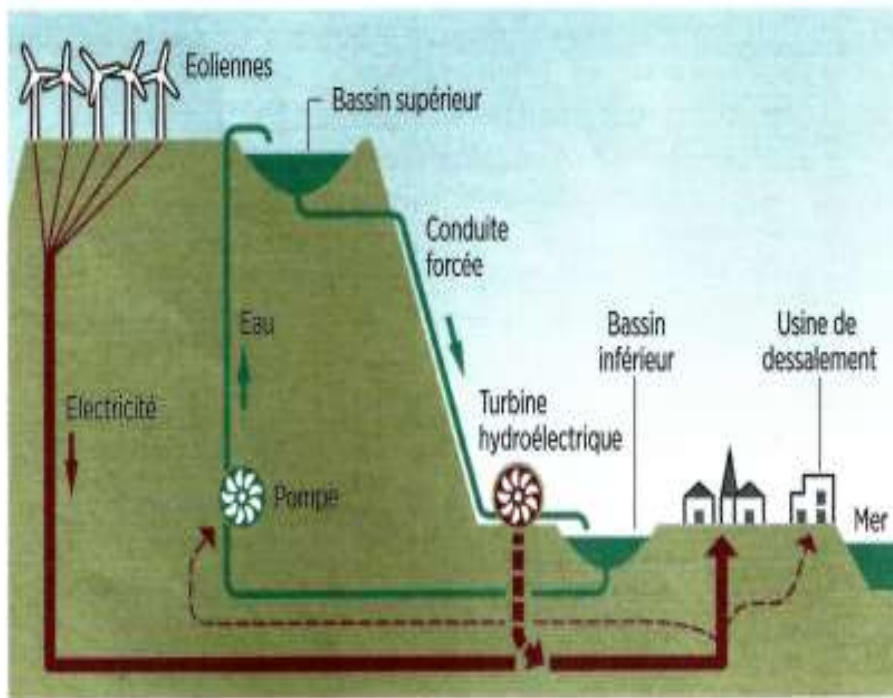
D'ABONDANTES **ENR INÉPUISABLES** (VARIABLES/RECHARGEABLES) VERSUS DES **ENERGIES MINIÈRES EPUISABLES** (FOSSILES/FISSILES)

■ = un an de consommation énergétique de l'humanité

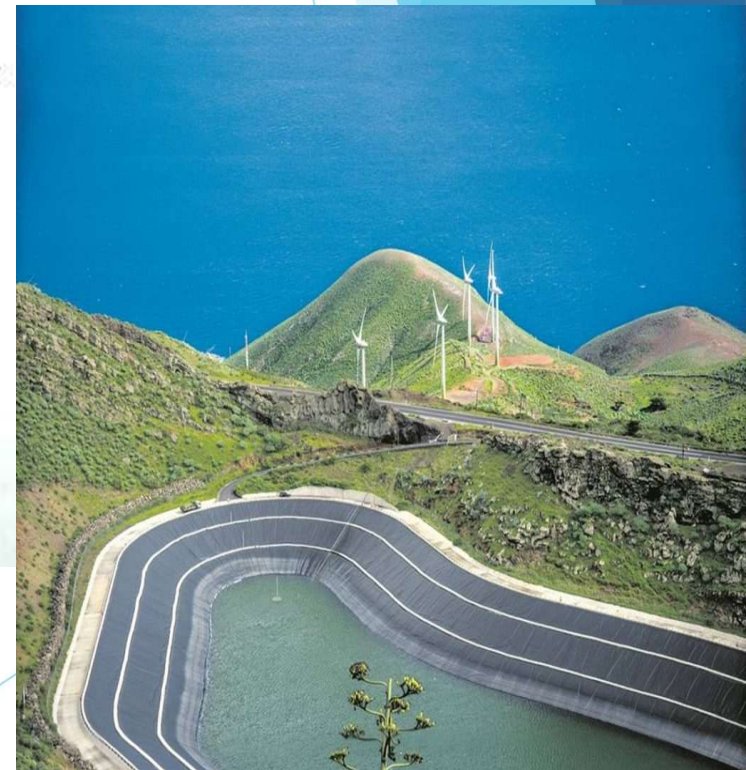


UN MIX « EOLIEN VARIABLE – HYDRO RECHARGEABLE » AUX CANARIES (2014)

GORONA DEL VIENTO : DU VENT, DE L'EAU ET UNE TECHNOLOGIE D'AVANT-GARDE



Cinq éoliennes d'une puissance totale de 11,5 mégawatts – 64 m de haut et 35 m d'envergure chacune – doivent répondre aux besoins en électricité des 11 000 habitants de l'île. Leur capacité correspond même au triple des besoins annuels. L'excédent, grâce à un savant système de pompage turbinage, servira à acheminer de l'eau depuis un bassin artificiel de 150 000 m³ creusé près du port de Valverde, jusqu'à un second bassin de 550 000 m³, situé 700 m plus haut, au pied des éoliennes. En cas de panne de vent – ce qui arrive rarement –, un lâcher d'eau du réservoir supérieur permettra d'alimenter six turbines hydrauliques d'une puissance totale de 11,3 mégawatts. Grâce à cette centrale, l'énergie éolienne passera donc, pour la première fois de l'histoire, du statut d'intermittente à celui de permanente. Les responsables du projet comptent aussi sur l'excédent d'électricité pour faire tourner une usine de dessalement d'eau de mer.



L'EMERGENCE DISRUPTIVE DU PHOTOVOLTAÏQUE EN RÉSEAU

→ LES ATOUTS DU PHOTOVOLTAÏQUE (PV)

- ▶ Une **ressource solaire** abondante partout disponible
- ▶ Des **coûts très compétitifs** (2 à 8 c€/kWh) et des rendements qui progressent (> 25%)
- ▶ Une **mise en œuvre rapide** (< 2ans) et la **longue durée de vie** des modules (> 30 ans),
- ▶ Son extrême **modularité** - du Watt (W) au milliard de Watts (GW)
- ▶ La grande **diversité des systèmes PV** (kits portatifs, kits domestiques, toitures tertiaires, agrivoltisme, centrales ...)
- ▶ La croissance rapide de **l'autoconsommation PV individuelle et collective** (Allemagne, Espagne, France, Australie ...)
- ▶ Des **modules recyclables** à plus de 95%
- ▶ Un **investissement sobre en CO2**

→ DES CONTRAINTES PHYSIQUES QUI PERTURBENT LES RÉSEAUX TRADITIONNELS

- ▶ Une **ressource variable** et assujettie au rythme diurne/nocturne
- ▶ Des **générateurs statiques sans inertie** (contrairement aux générateurs tournants massifs-thermiques ou hydrauliques)
- ▶ La nécessité pour les centrales de **réserver du foncier** (1 à 1,5 ha/MWc)

→ UN BESOIN DE FINANCEMENTS DE LONGUE DURÉE SUR LES INVESTISSEMENTS PV

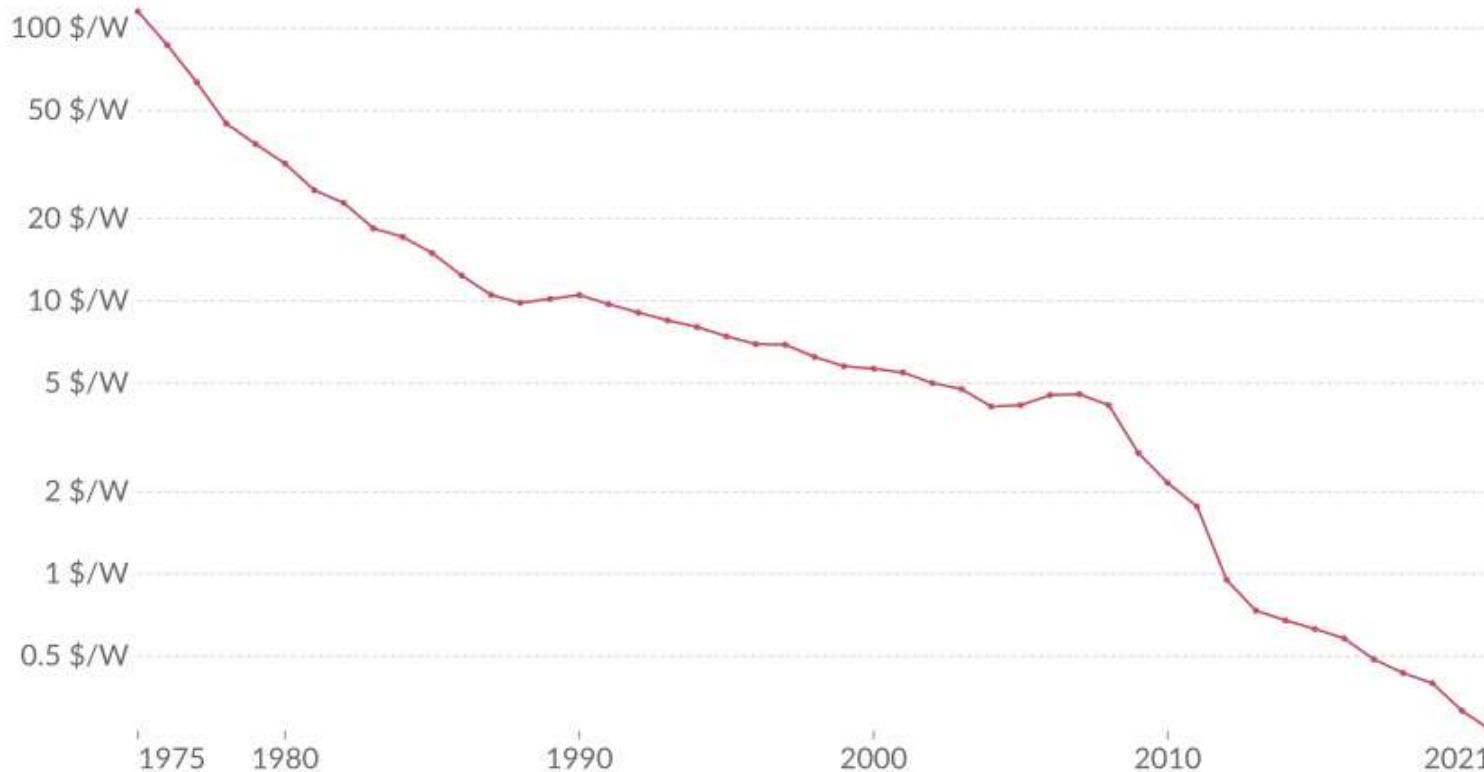
- ▶ Des investissements capitalistiques s'amortissant sur la longue durée (> 20-30 ans)
- ▶ Des coûts du kWh PV très sensibles au coût du financement (WACC)

A présent, une forte croissance mondiale du PV après 50 ans de baisse de coûts des modules

Solar (photovoltaic) panel prices

This data is expressed in US dollars per Watt, adjusted for inflation.

Our World
in Data



Data source: Nemet (2009); Farmer & Lafond (2016); International Renewable Energy Agency (IRENA)

Note: Data is expressed in constant 2021 US\$ per Watt.

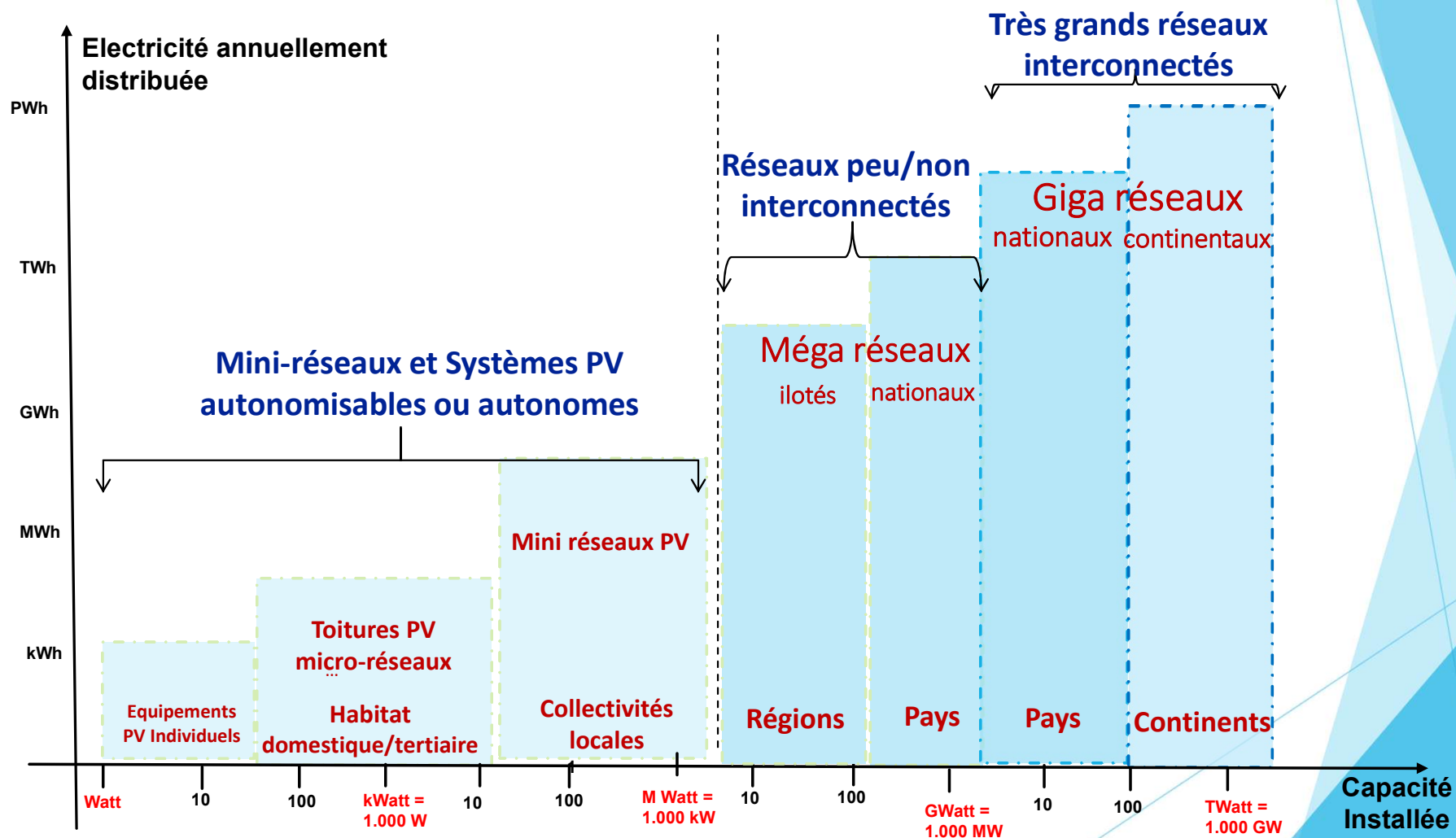
OurWorldInData.org/energy | CC BY

UNE CONJONCTION D'AVANCÉES TECHNOLOGIQUES QUI BOUSCULE LES RÉSEAUX ELECTRIQUES

- ▶ **La progression massive de l'électro-EnR variables** (PV partout, éolien nombreuses zones & régions) de moindres coûts (5 à 8 c€/kWh PV ou éolien, 10-20 c€/kWh gaz ou fuel, >10-15 c€/kWh nucléaire neuf).
- ▶ **L'accélération de l'autoconsommation PV individuelle et collective**
- ▶ **Le déploiement de nouveaux modes de stockage/flexibilité associant batteries et EnR rechargeables** (turbinage-pompage hydro, cogen à base de biomasse, stockage chaleur...)
- ▶ **Des réseaux de plus en plus intelligents dotés d'outils IA de pilotage/régulation** permettant d'injecter de fortes proportions d'EnR variables et d'accroître la flexibilité des réseaux
- ▶ **L'électrification croissante** des secteurs d'usage: **transport** (mobilité électrique), **bâtiment** (pompes à chaleur, solarisation toitures), **industrie** (process énérgo-intensifs), **agriculture** (agrivoltaïsme ...)

Small PV is beautiful, mais le « gros » chasse le « petit »

Quand Giga-Nuk (Giga-Fos) et micro PV sont dans un bateau, c'est micro qui tombe à l'eau*

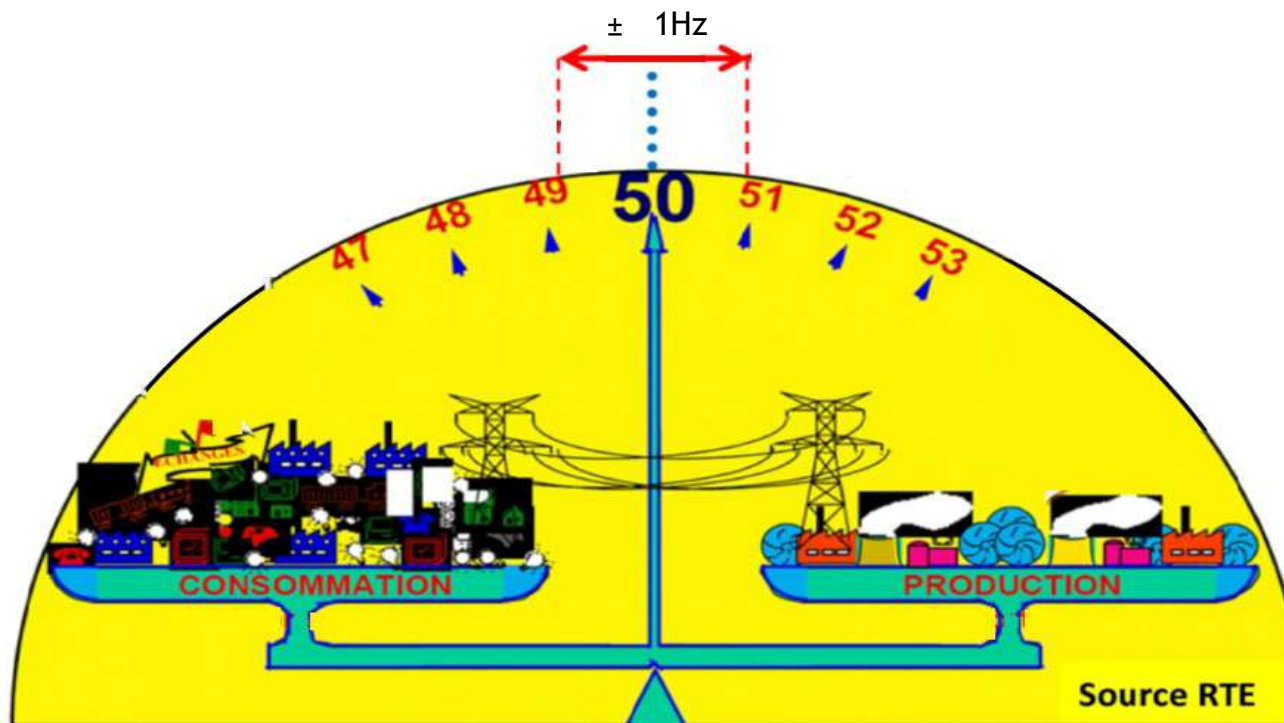


* Giga-Nuk = Giga-centrales nucléaires; Giga-Fos= Giga-centrales fossiles (charbon, pétrole, gaz)

RÉNOVER LA RÉGULATION DE RÉSEAUX POUR INTÉGRER LA CROISSANCE DE L'ELECTRICITÉ VARIABLE (PV, EOLIEN...)

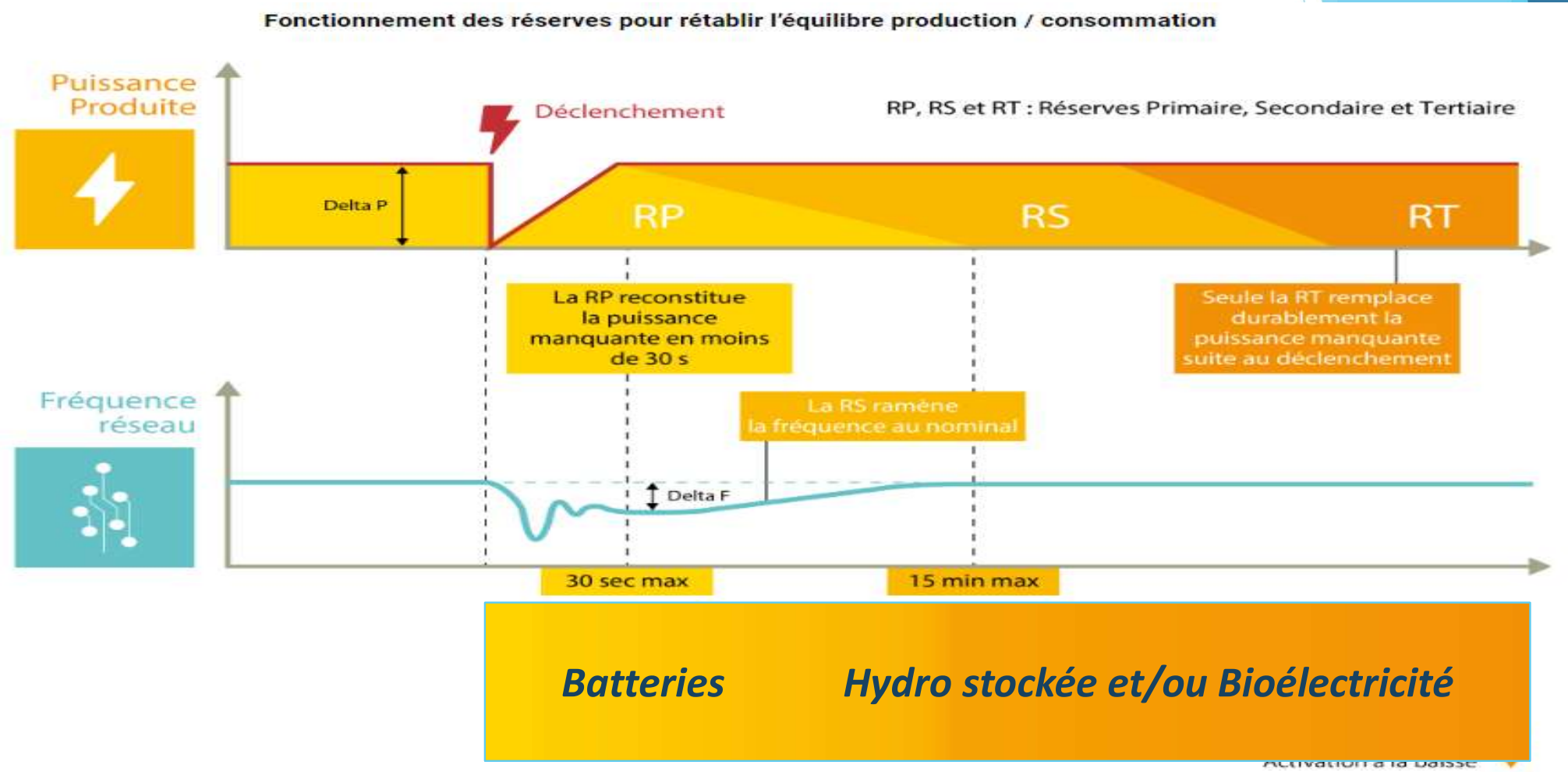
L'électricité ne se stockant pas → À tout instant : PRODUCTION = CONSOMMATION

L'INDICATEUR de cet équilibre INSTANTANÉ : la FRÉQUENCE du réseau



DÉPLOYER D'AUTRES MODES DE STOCKAGE ET DE RÉGULATION EN COMBINANT :
batteries/hydro retenue /cogen biomasse/gestion de la demande (autoconsommation/effacement)

RÉNOVER LA RÉGULATION DE RÉSEAUX À PROPORTION CROISSANTE DE VARIABLES



Nouveaux modes de rétablissement et de gestion de l'équilibre production/consommation

La transformation d'ici 2035/2050 des réseaux électriques

- ▶ *L'accélération des avancées technologiques* oblige à re-programmer les réseaux électriques et à rénover leurs systèmes de régulation
- ▶ Grâce à l'IA-système, *il est maintenant rentable de substituer aux hydrocarbures et à l'uranium* un mix valorisant les EnR variables et rechargeables localement disponibles et des batteries.
- ▶ La *forte progression des EnR Variables et Rechargeables* dans les réseaux contraint les opérateurs, les régulateurs et les ministères de l'énergie (et ceux des finances) à *évoluer et à accélérer la transformation des réseaux*.
- ▶ *Les pays/régions sont gagnants-gagnants en engageant cette transformation* de leur réseau, qui s'avère *bénéfique pour leur économie* (moindres importations et création d'emplois locaux), *leurs deniers publics* (diminution des coûts de fonctionnement des réseaux) et *pour le climat* (réduction des émissions de CO2)

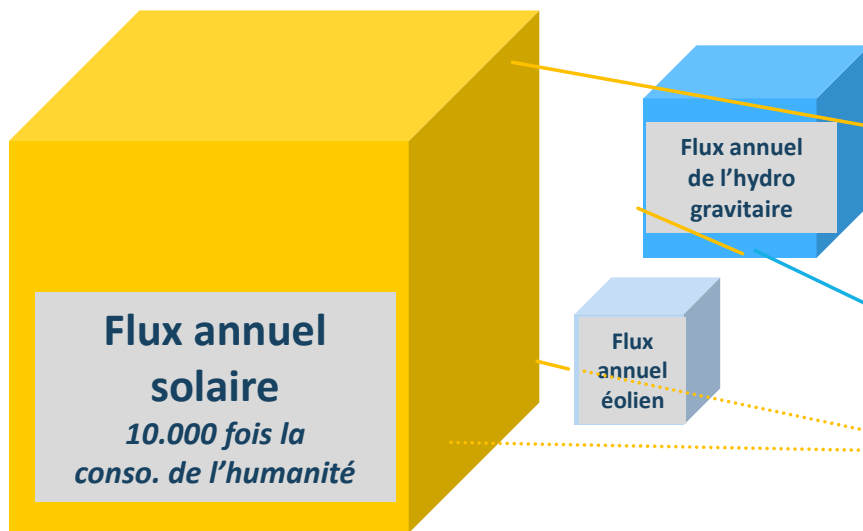
Tendre vers des mix électriques 100% EnR d'ici 2035/2050 ?

- En déclinant la **diversité** et la **complémentarité** des **EnR locales et** en **mixant** sur les réseaux :
 - **les EnR disponibles en flux variables** - PV, éolien, hydro au fil de la ressource
 - **les EnR aménagées en stocks rechargeables** - hydro retenue, aménagements de biomasses (les capacités fossiles étant réservées en appoint et non plus en base)
- **Reprogrammer les investissements énergétiques** à court [2026-30] moyen [2030-35] terme sur:
 - **la production** : PV (+ éolien/hydro fil de l'eau), **Hydro rechargeable**, **Bioélectricité** (+ Batteries)
 - **les usages** : **Plans sectoriels d'efficacité/sobriété** - *Cogen agro-industrielles, Bâtiments HQE*
Eclairage/Réfrigération efficace, Mobilité sobre, IA frugale...
 - **les réseaux** : **en rénovant les services systèmes** et déployant des **batteries+EnR rechargeables**
- **Traiter spécifiquement les P-ZNI (Pays et Zones Non/peu Interconnectés)** dotés de capacités limitées, et de mix électriques tributaires du fuel, générant des MWh à coûts élevés

DÉPLOYER TOUTE LA PALETTE DES ENR FLUCTUANTES ET RECHARGEABLES POUR S'AFFRANCHIR DES ENERGIES FOSSILES ET FISSILES

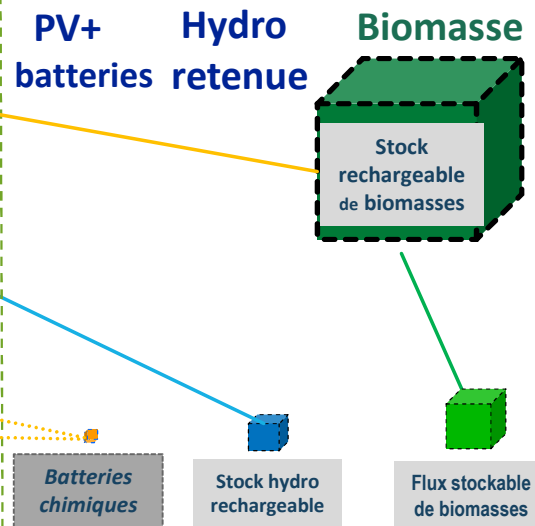
■ = un an de consommation énergétique de l'humanité

ENR EN FLUX VARIABLES



CAPTER BEAUCOUP PLUS
DE FLUX D'ENR VARIABLES

ENR RECHARGEABLES

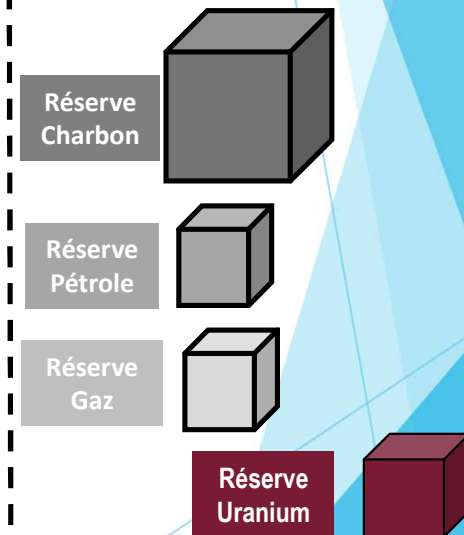


AMÉNAGER ET GÉRER PLUS ET
MIEUX LES ENR RECHARGEABLES

ENERGIES MINIÈRES

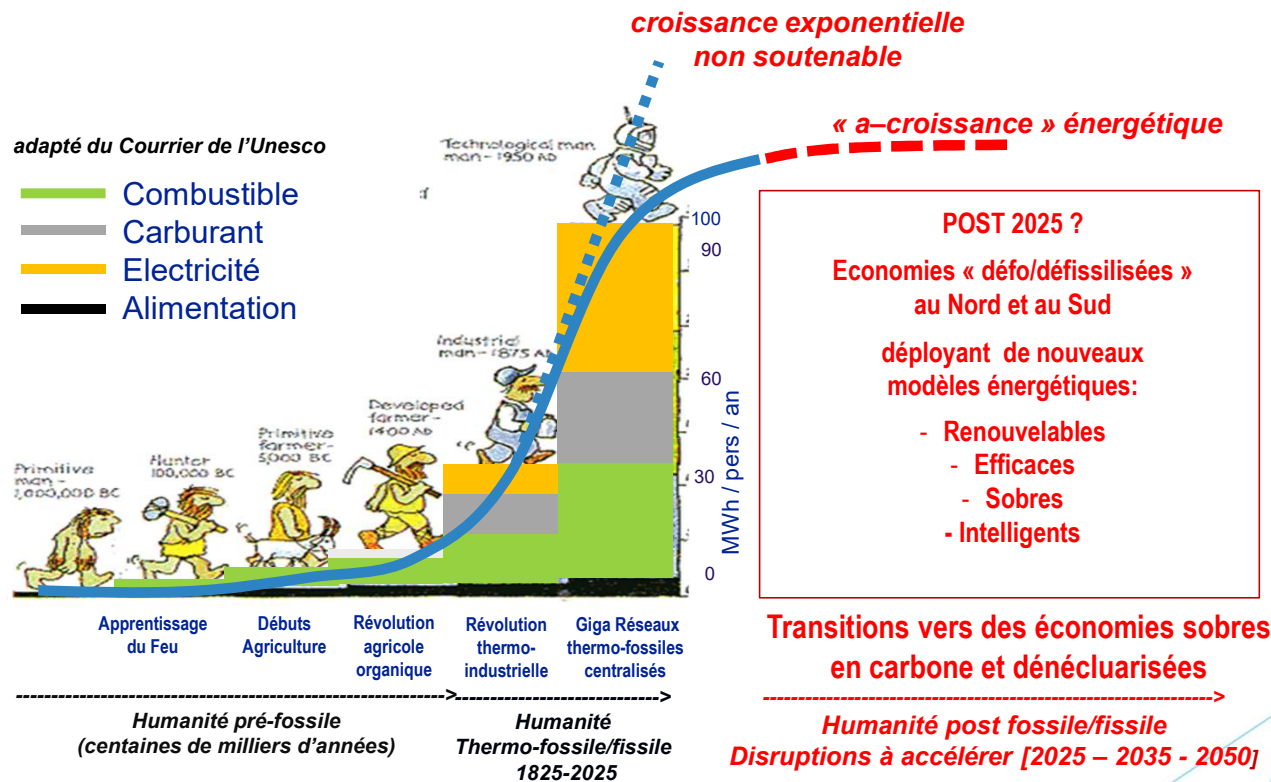
FOSSILES

FISSILES



CONSERVER EN RÉSERVE LES
ÉNERGIES FOSSILES ET FISSILES

L'avènement de l'ère post fossile/fissile d'ici 2035-2050 ?





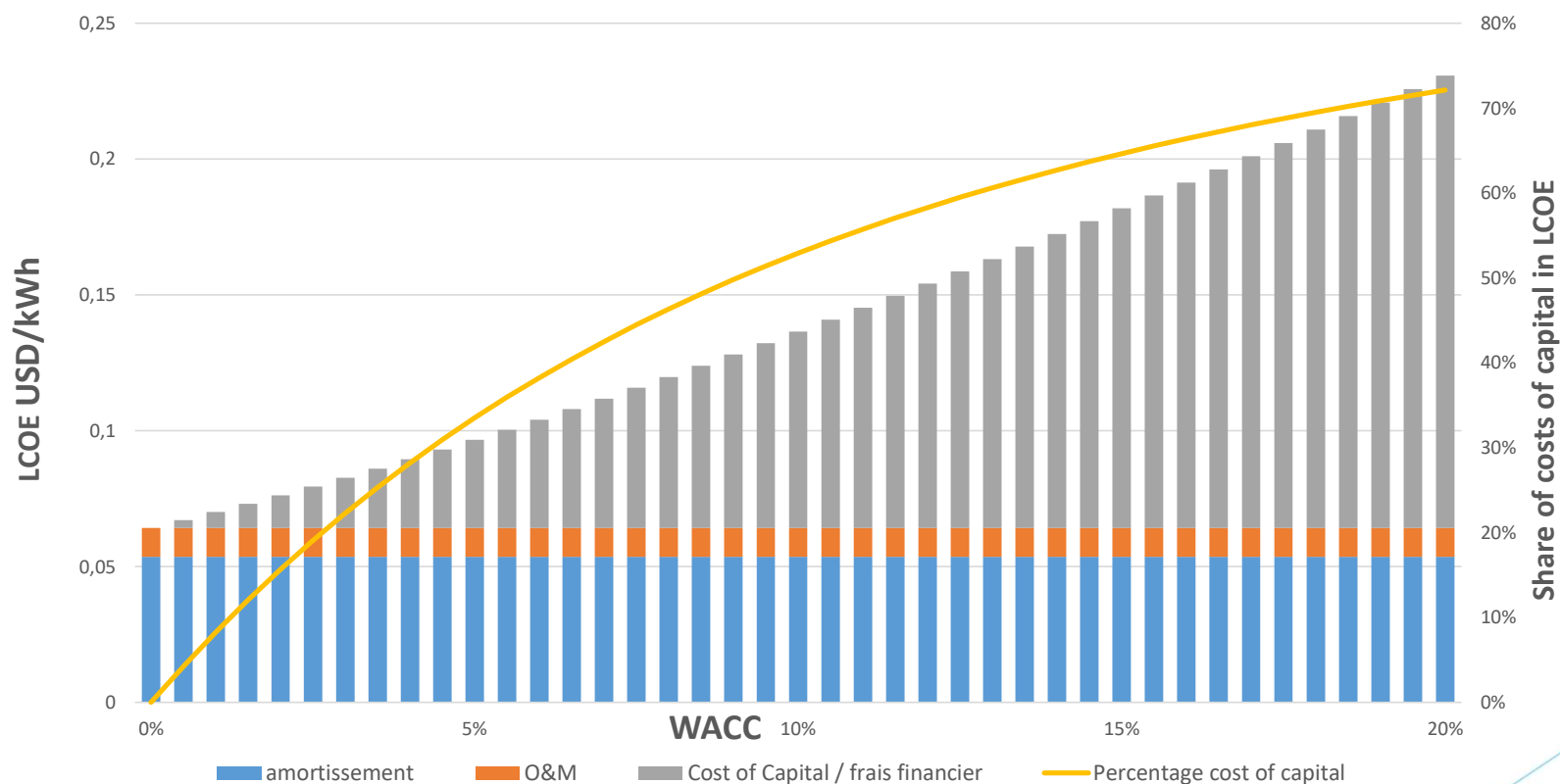
MERCI POUR VOTRE ÉCOUTE

COMPLÉMENTS

- **Un besoin de financements de longue durée sur l'électricité renouvelable (PV, éolien...)**
- **Mix combinant PV-Hydro retenue-Biomasse locale et batteries en Guyane**
- **Bibliographie sélective**

DES FINANCEMENTS DE LONGUE DURÉE SUR LES INVESTISSEMENTS PV/ÉOLIEN

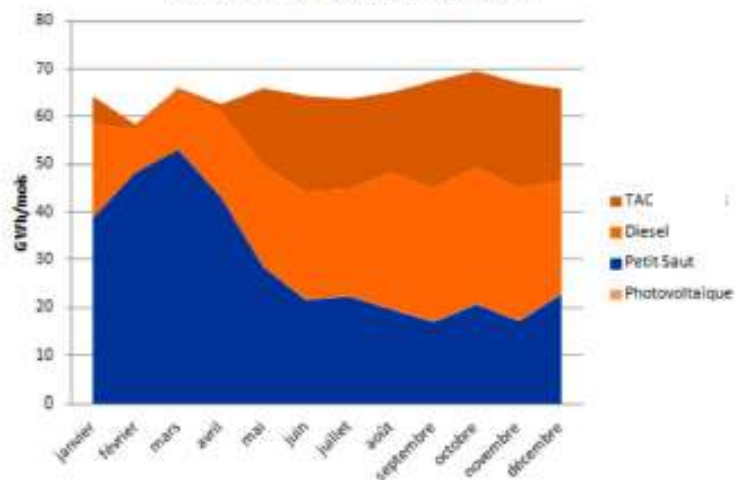
LA FORTE INCIDENCE DU **COÛT DU CAPITAL (WACC)**
SUR LE **COÛT DE L'ÉLECTRICITÉ RENOUVELABLE (LCOE)**



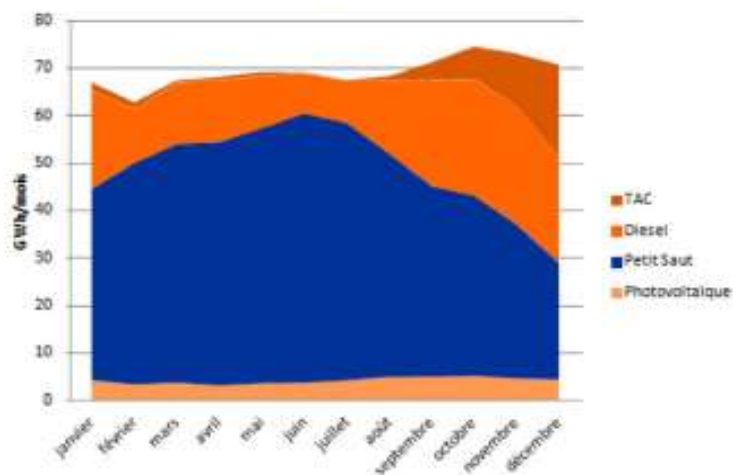
| | | |
|-------|--|------|
| I_0 | Investissement centrale PV (US \$/kW installé) | 1500 |
| n | nombre d'années | 20 |
| Pr | Productible moyen (kWh/kW/an) | 1400 |
| x | cout maintenance = x% de l'investissement | 1% |

MIX (virtuel) « PV-BATTERIES-HYDRO-BIOMASSE LOCALE » EN GUYANE

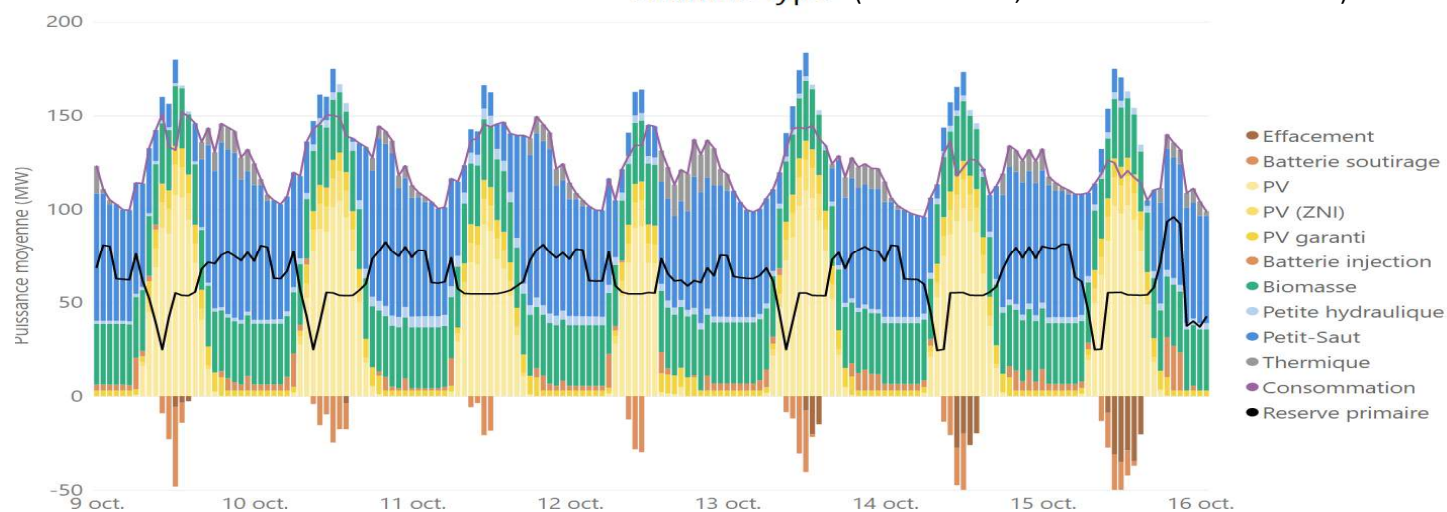
Mix électrique au pas mensuel
Année sèche (exemple de 2009)



Mix électrique au pas mensuel
Année de très forte pluviométrie (exemple de 2012)



Journée type (octobre 2009, saison et année très sèches)



DES PRÉCURSEURS ET DES OUVRAGES FONDATEURS DANS LES ANNÉES 1970

Nicholas Georgescu-Roegen

The Entropy Law and the Economic Process (1971)

La Décroissance, Entropie-Ecologie-Economie

Ivan Illich - *La convivialité* (1973)

Dennis & Donna Meadows (et alii)

Limits to growth / Halte à la croissance (1973)

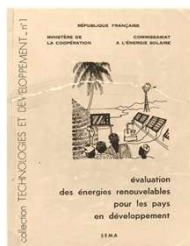
René Dumont - *L'utopie ou la mort* (1973)

E F Schumacher - *Small is beautiful* (1973)

A study of economics as if people mattered,

Idées de capital naturel (la nature = un capital et non un revenu)

et de technologies appropriées à échelle humaine



Evaluation des EnR pour les PED (1977)

Ministère de la Coopération et Commissariat à l'Energie Solaire

Jacques Giri (1932-2021) et al (SEMA) - Yves Lambert (COMES)

D'AUTRES OUVRAGES FONDATEURS SUR L'ÉNERGIE-MONDE, SON ÉCONOMIE, SA MAÎTRISE *ET SON EXERGIE (= LA FRACTION VALORISABLE DE L'ÉNERGIE)*

- **Le dossier de l'Energie**, CFDT, Groupe confédéral Energie (1983)
- **Les servitudes de la puissance, une histoire de l'énergie** (1986) JC.Debeir, JP.Deléage, D.Hémery
- **L'économie mondiale de l'énergie**, Jean Marie Martin (1990)
- **Pour une pensée systémique**, Donella H. Meadows (1993)
- **Maîtrise de l'Energie pour un monde viable**, Bernard Laponche et al. ICE (1997)
- **Reinventing Fire**, Amory Lovins and Rocky Mountain Institute (2020)
- **Energies et inégalités, une histoire politique**, Lucas Chancel (2025)
- **The Electrotech Revolution, the shape of things to come**, Think Tank EMBER (2025) – *accès libre sur le net*
- **Le solaire PV en France: réalité, potentiel et défi** chercheuses-eurs du CNRS/FrPV (2025) – *accès libre sur le net*

+ (EN BONUS) INTRODUCTION À L'EXERGIE SOLAIRE ET TERRESTRE

- **Penser Exergie plutôt qu'Energie**, Vincent Nouyrgat, Sciences et Vie (2013, numéro spécial repris en 2018)
- **Facts & Figures, l'Exergie**, ENEA (2013) - *accès libre sur le net*
- **Exergetics**, Goran Walls - Exergy, Ecology, Democracy (2009) - *accès libre sur le net*

+ Publications des Associations **Global Chance et **NégaWatt****