

“La Winterstromlücke au-delà des polémiques”

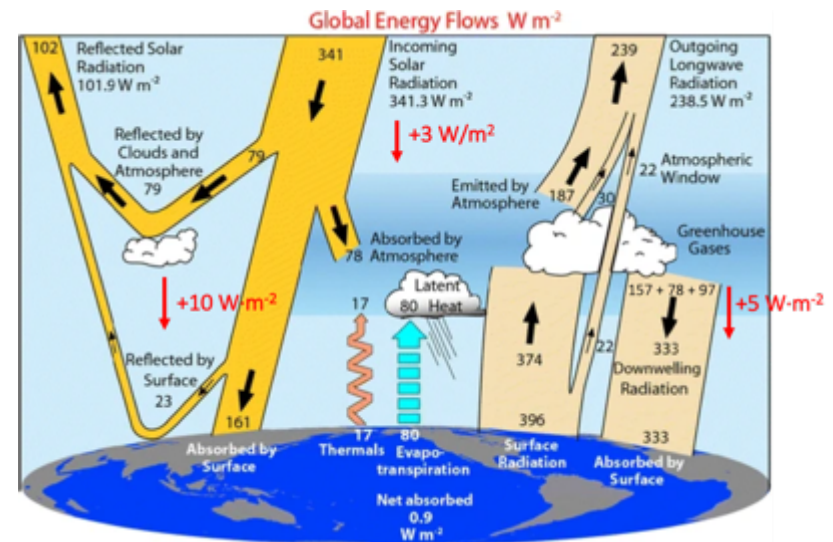
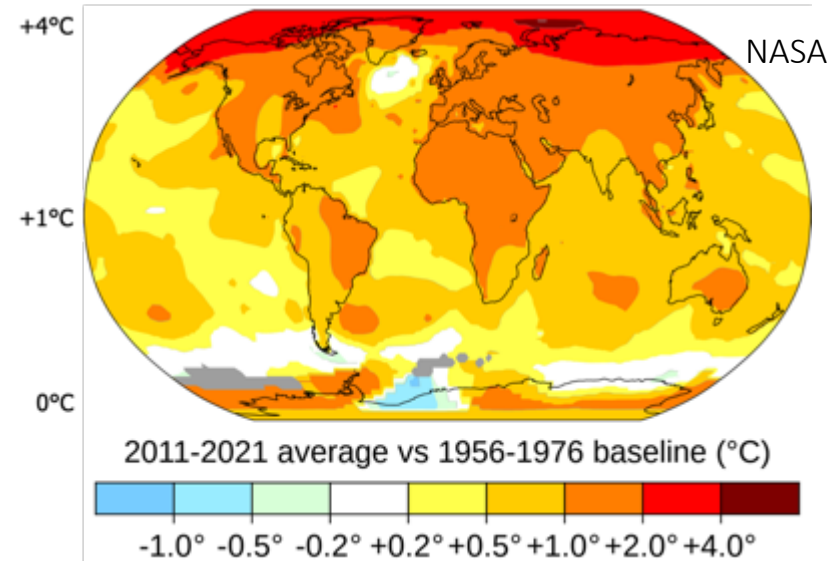


Andreas ZÜTTEL, Prof. Dr.

e: andreas.zuettel@epfl.ch

m: +41 79 484 2553

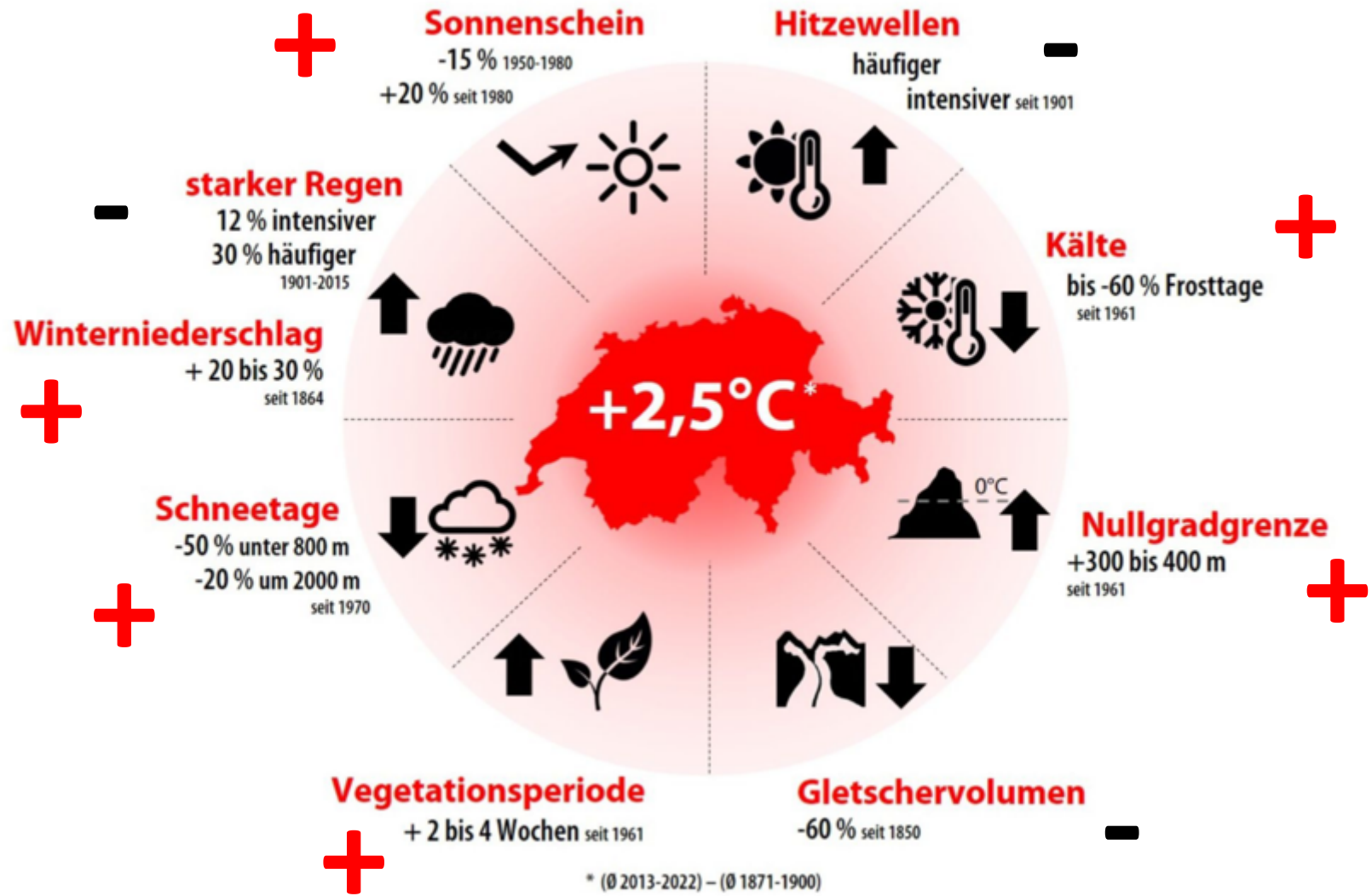
U: <http://lmer.epfl.ch>



$$333 \text{ W/m}^2 \rightarrow \Delta T = 33^\circ\text{C}$$

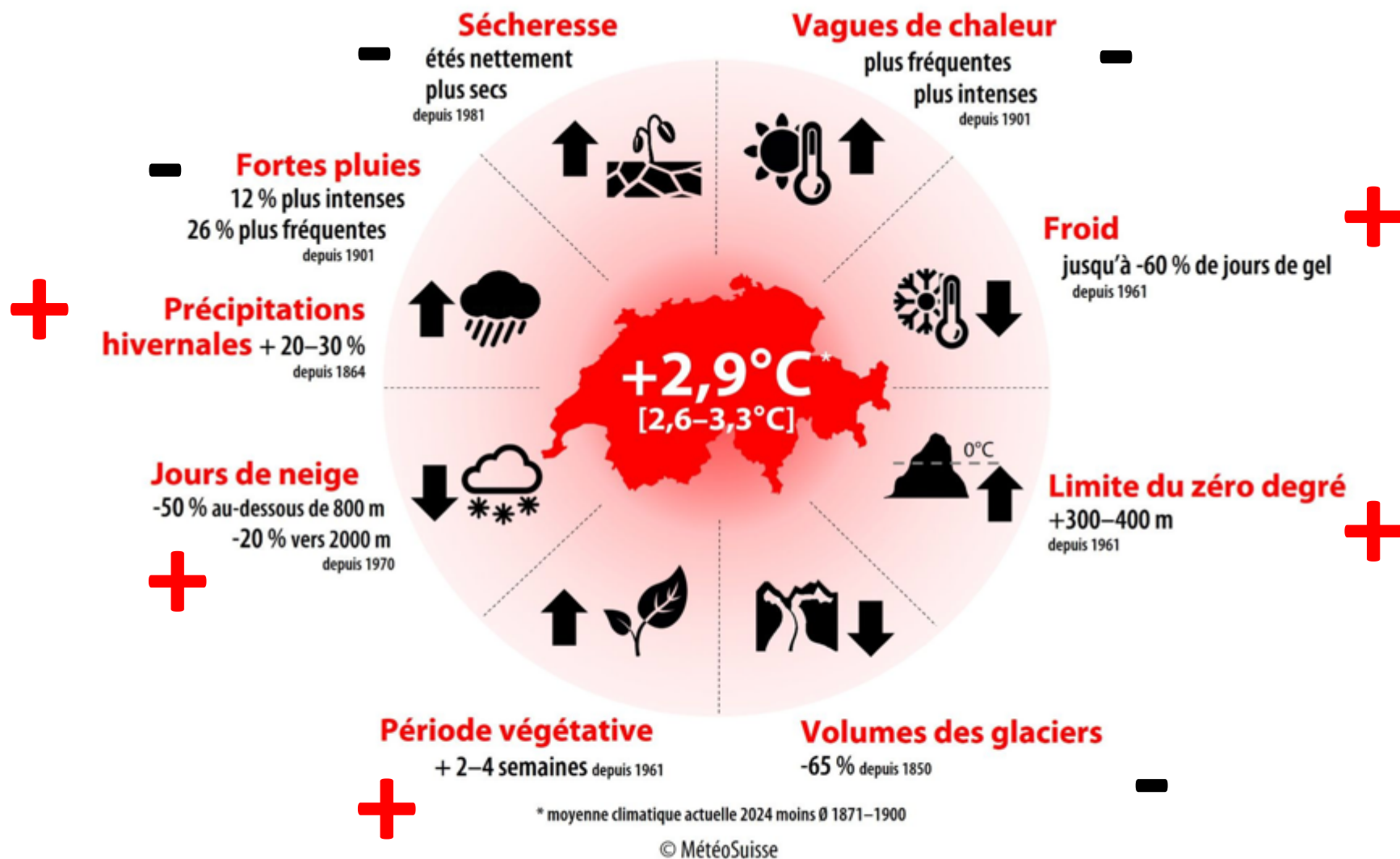
$$0.1^\circ\text{C}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$$

Conséquences du changement climatique en Suisse (2023)



Ref.: <https://www.meteoswiss.admin.ch/climate/climate-change.html>

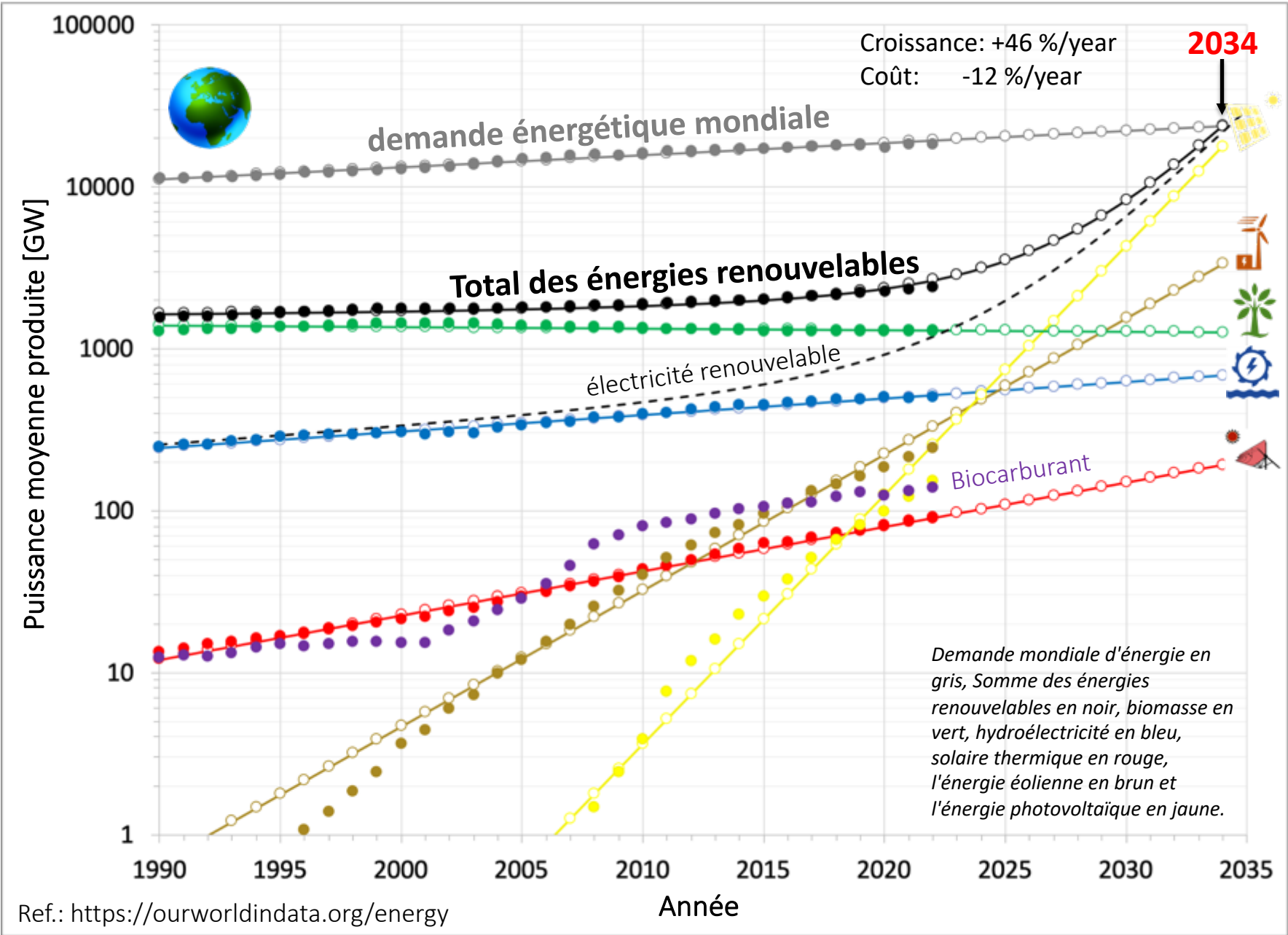
Conséquences du changement climatique en Suisse (2025)



Changements importants du climat en Suisse basés sur des données d'observation. (OFEV/MétéoSuisse (2020), mises à jour et adaptées)

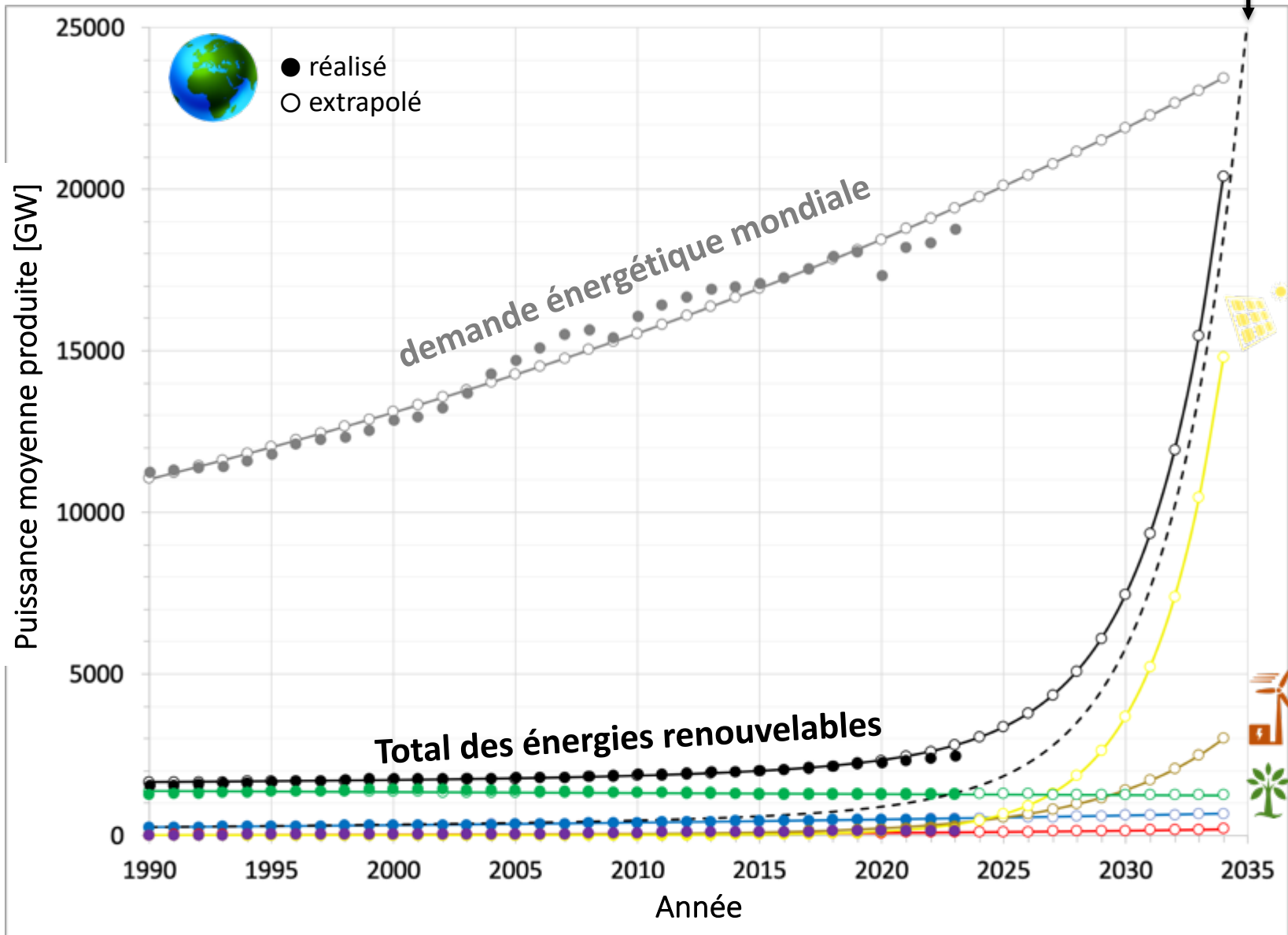
Ref.: <https://www.meteoswiss.admin.ch/climate/climate-change.html>

Production mondiale d'énergies renouvelables

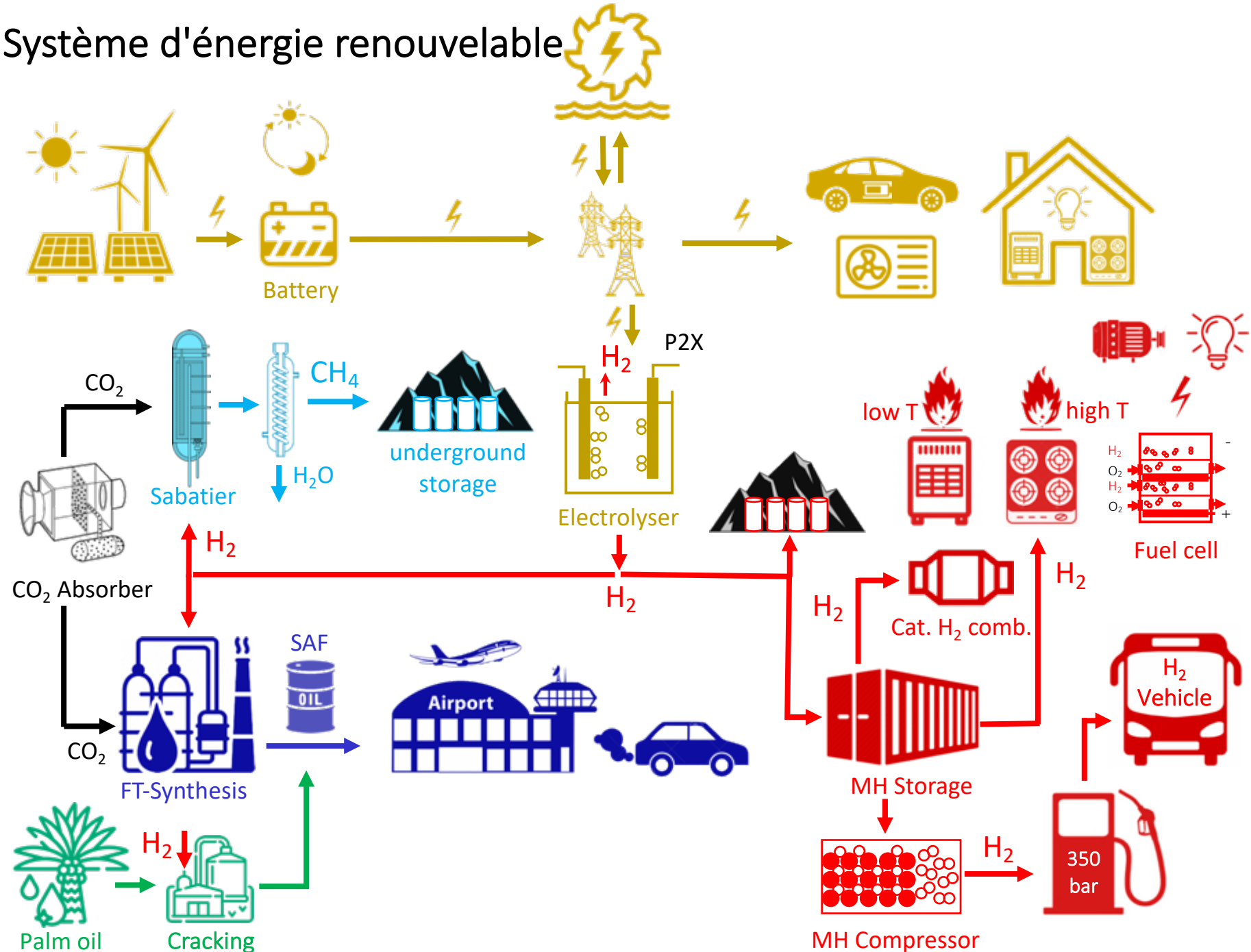


Ref.: <https://ourworldindata.org/energy>

Production mondiale d'énergies renouvelables

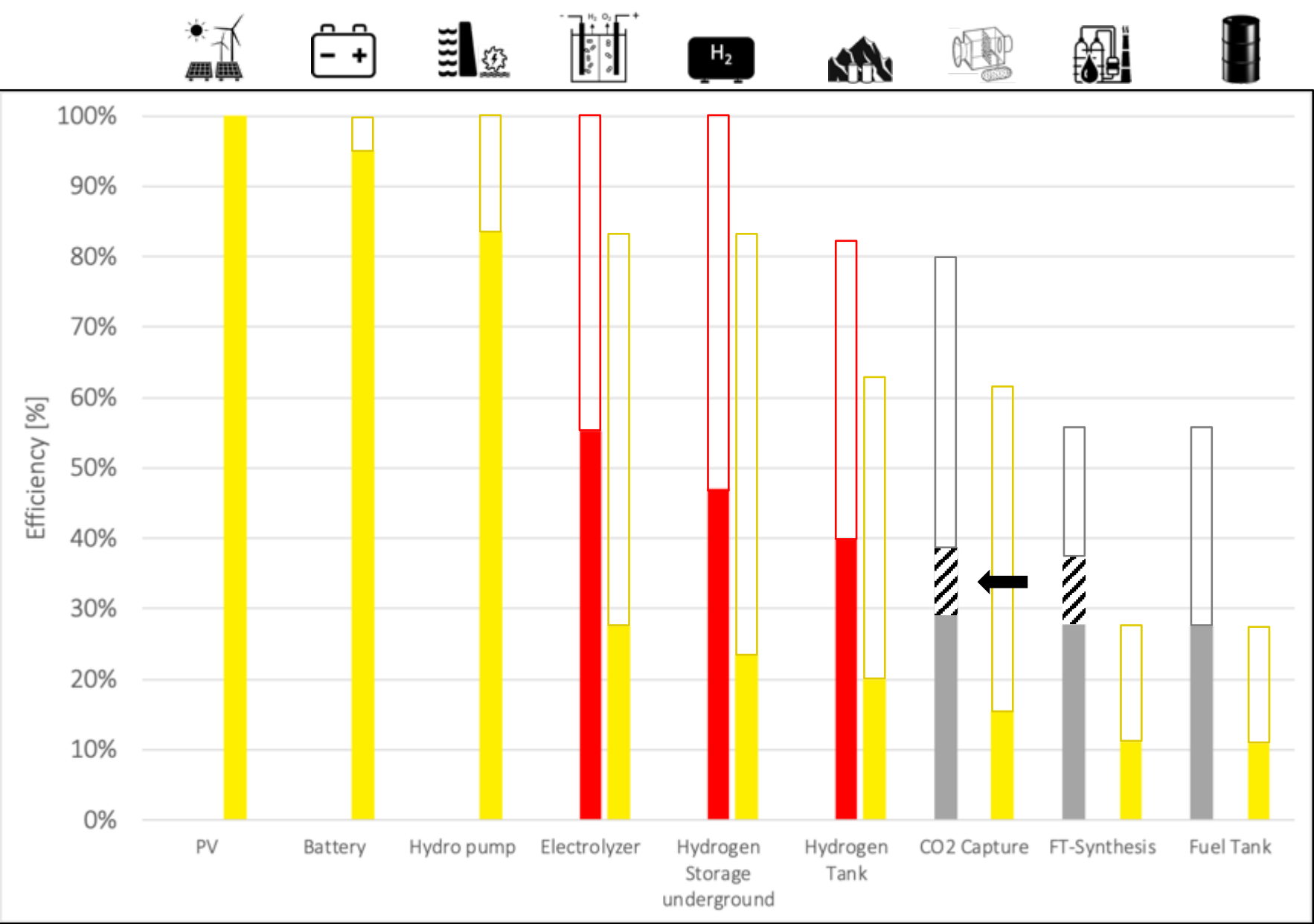


Ref.: <https://ourworldindata.org/energy>, <https://www.pv-magazine.com/2023/02/16/global-solar-installations-may-hit-350-6-gw-in-2023-says-trendforce/#:~:text=2022>, and <https://ourworldindata.org/energy>

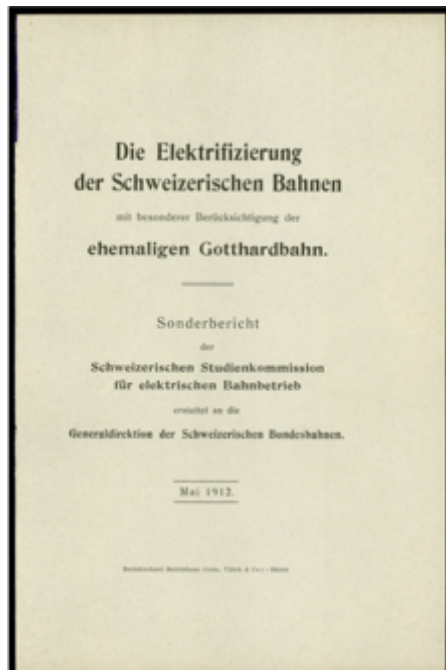


Efficacité de la conversion énergétique

Power to X (P2X)



Décision suisse pour l'électricité



Ref.: "Die Elektrifizierung der Schweizerischen Bahnen mit besonderer Berücksichtigung der ehemaligen Gotthardbahn.", Sonderbericht der Schweizerischen Studienkommission für elektrischen Bahnbetrieb erstattet an die Generaldirektion der Schweizerischen Bundesbahnen. Mai 1912.

KRAFTWERK MÜHLEBERG

ERBAUT 1917 – 1920

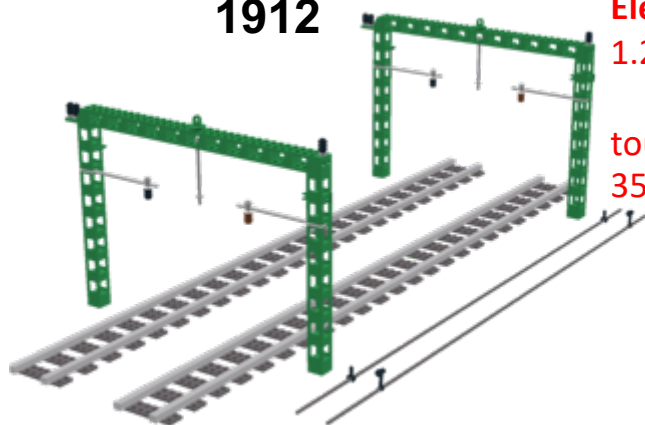
ZUR • ZEIT • DES • KRIEGES • UND • WIRTSCHAFTLICHER • NOT
 EIN • DENKMAL • DER • TATKRAFT • UND • PFLICHTTREUE
 DER • LEITENDEN • MÄNNER • UND • DER • ARBEITER

1912

Electrifiant

1.23 – 2.6 MCHF/km

tous les 27m est un pôle,
 35 – 70 kCHF par pôle



Les voies ferrées coûtent 62 MCHF/km
 (les autoroutes coûtent entre 150 et
 330 MCHF par km)



Ref.: Allemagne : Lindau -München 500 M€ pour 189 km, y compris protection
 contre le bruit, nouvelle gare...

Danemark : ensemble du chemin de fer 1'600 M€ pour 1300 km

Le changement majeur de l'économie de l'énergie en Suisse



Catastrophe de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi



11 mars 2011



24 mars 2011

Tremblement de terre de 11 mars 2011



25. Mai 2011 Le Conseil fédéral a décidé de ne plus miser sur l'énergie nucléaire à l'avenir. Les centrales nucléaires existantes doivent rester raccordées au réseau tant qu'elles sont sûres. Confirmation par le Parlement le 8 juin 2011.

Accord de Paris sur le climat 2014



Stratégie énergétique suisse 2050

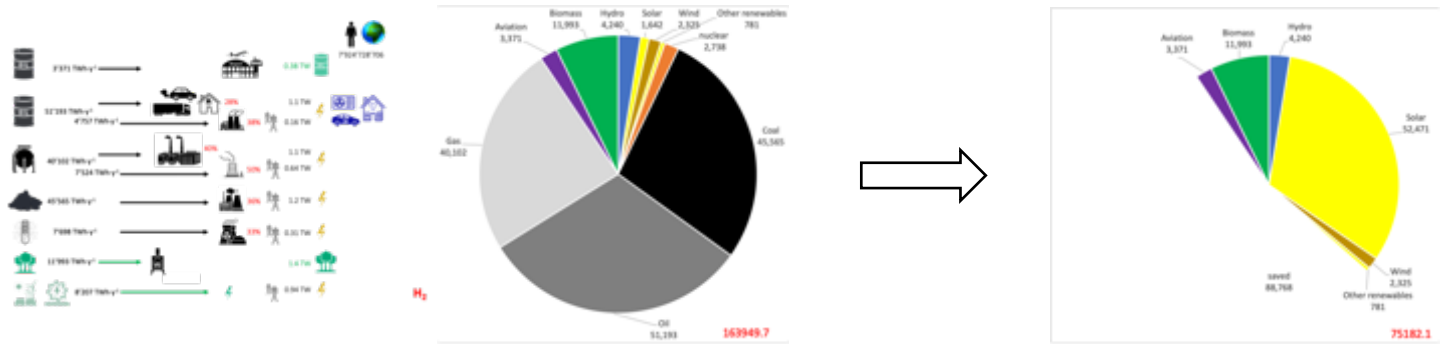


Le 21 mai 2017, le peuple suisse a accepté la révision de la loi fédérale sur l'énergie. Les objectifs de cette révision sont de réduire la consommation d'énergie, d'augmenter l'efficacité énergétique et de promouvoir l'utilisation des énergies renouvelables. En outre, la version révisée interdit la construction de nouvelles centrales nucléaires.

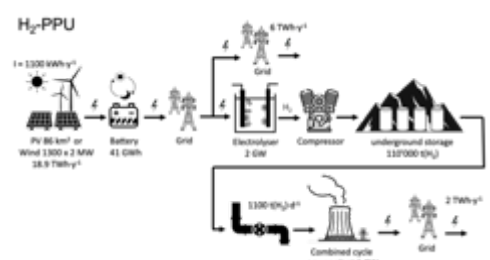


Modèle heuristique pour la transition énergétique

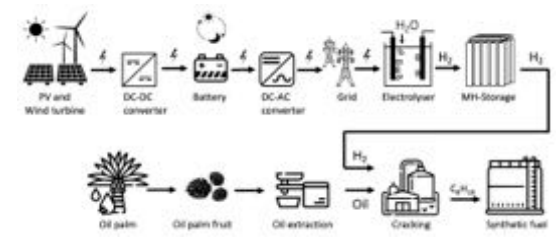
Analyse de la production et de la consommation d'énergie



Solutions généralisées avec des unités de centrale électrique (PPU)



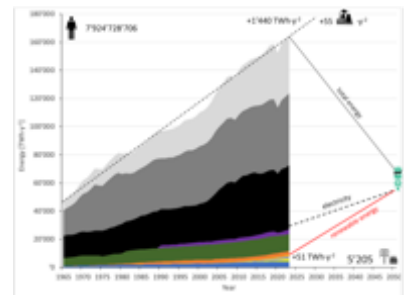
Electrification



CO₂ neutral fuel

Solution technique optimisée et impact économique minimisé

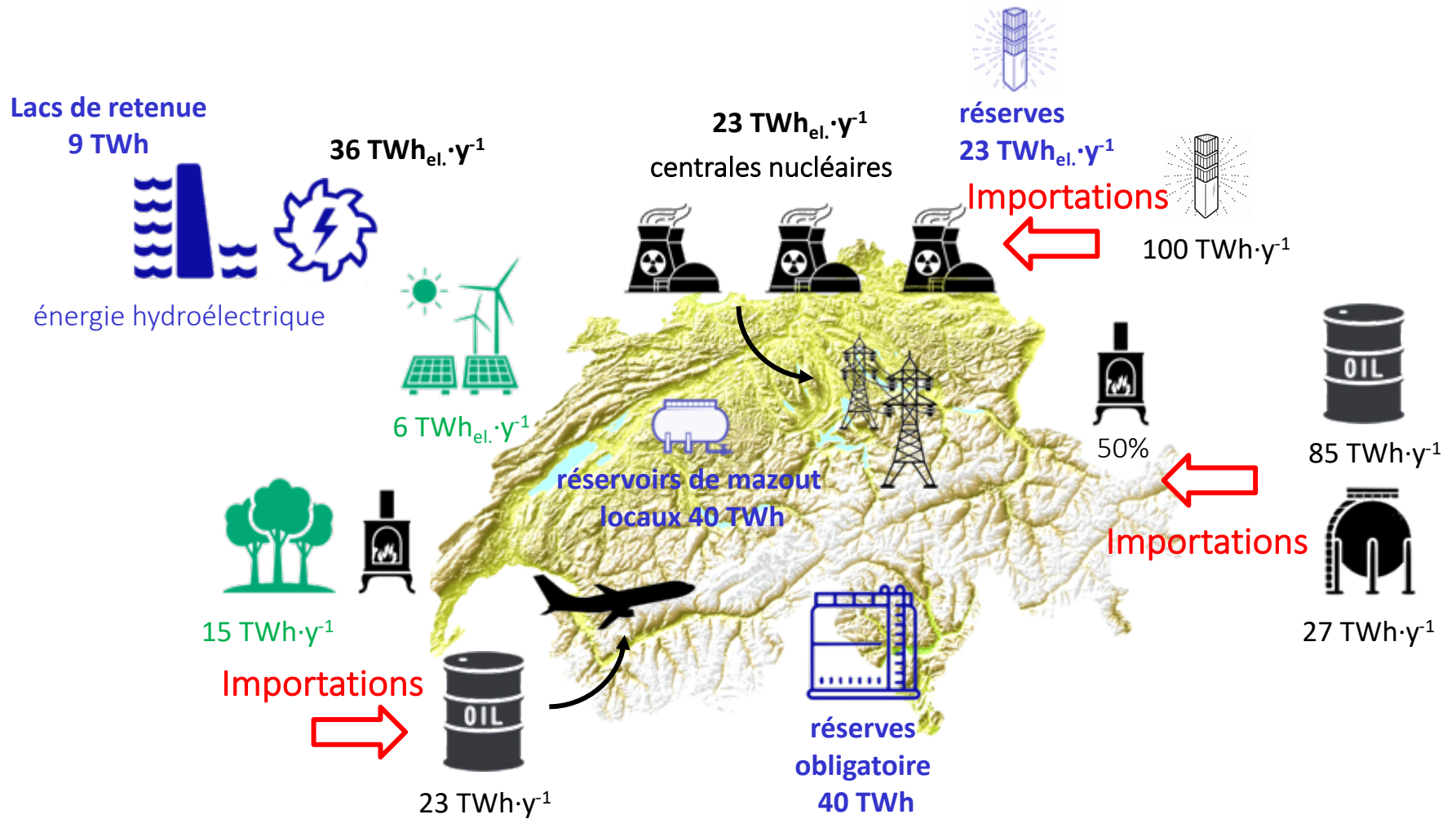
KWE's	W _{el} + Q [TWh·y ⁻¹]	LCOE [€·kWh ⁻¹]	CAPEX [€·kW ⁻¹]	OPEX [€·kW ⁻¹ ·y ⁻¹]	TICS [GW·y ⁻¹]	Fläche (PV) [km ²]	Bemerkungen
	8.7 + 17.4	0.05	5.5	0.3	0.4	1	Energie, Import U, kompakt, billig
	8.7 + 8.7	0.11	3	0.9	0.9	1	Import Erdgas, fossil, CCS
	8.7 (75%)	0.13	9.6 + 6	1	1.1	100	Energielücke, gross
	8.7 + 2.2	0.45	71	1	3.9	150	universal, sehr gross, teuer
	8.7 + 8.7	0.3	2	3.0	3.1	1	Import, billige Speicher
	8.7	0.05	2	0.1	0.1	10	local, dynamisch billig, Speicher
	8.7	0.16	2 + 6	0.5	1.4	850	Meeresbucht, Gezeiten





Économie énergétique suisse

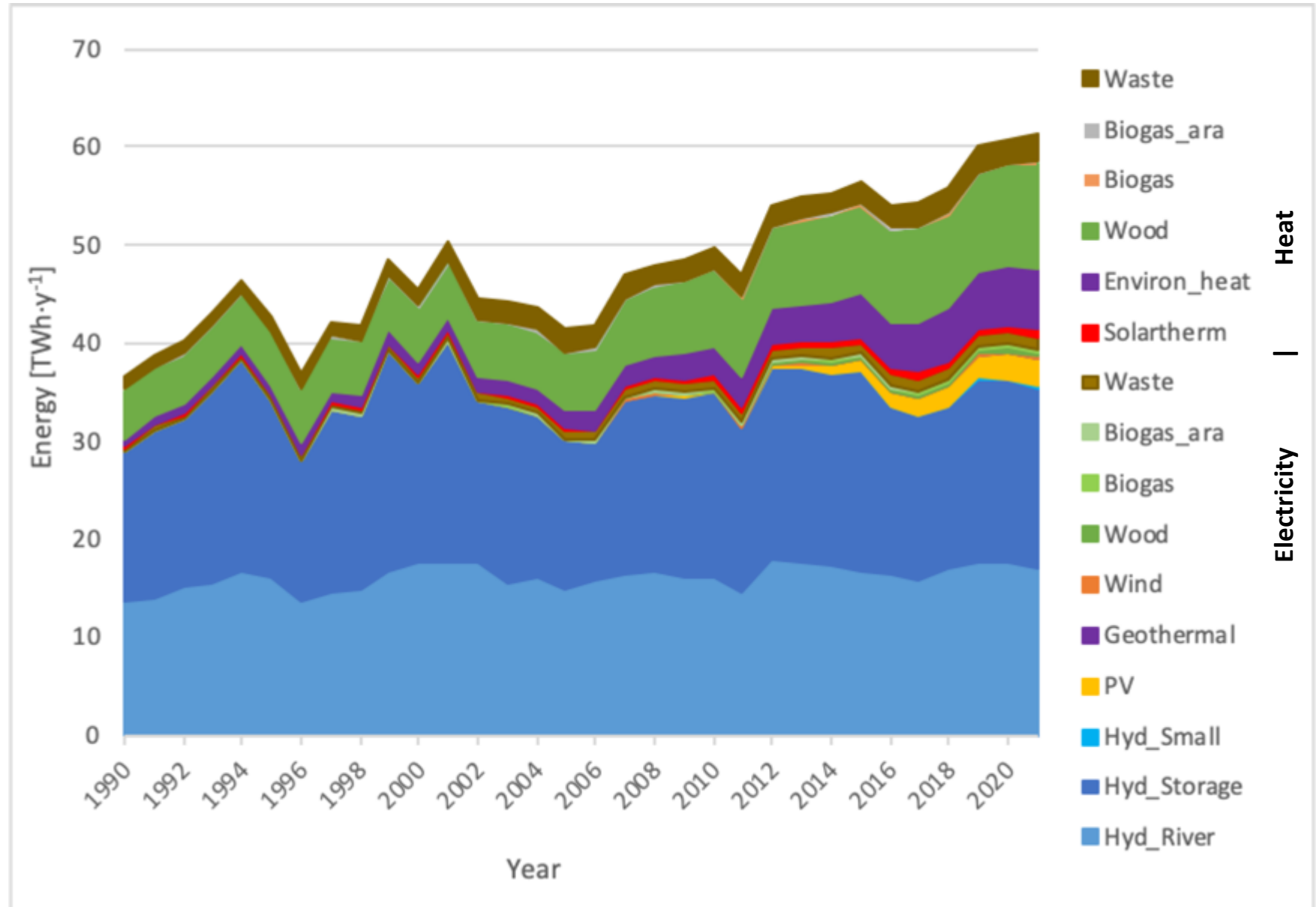
Importations, réserves





Production d'énergie renouvelable en Suisse

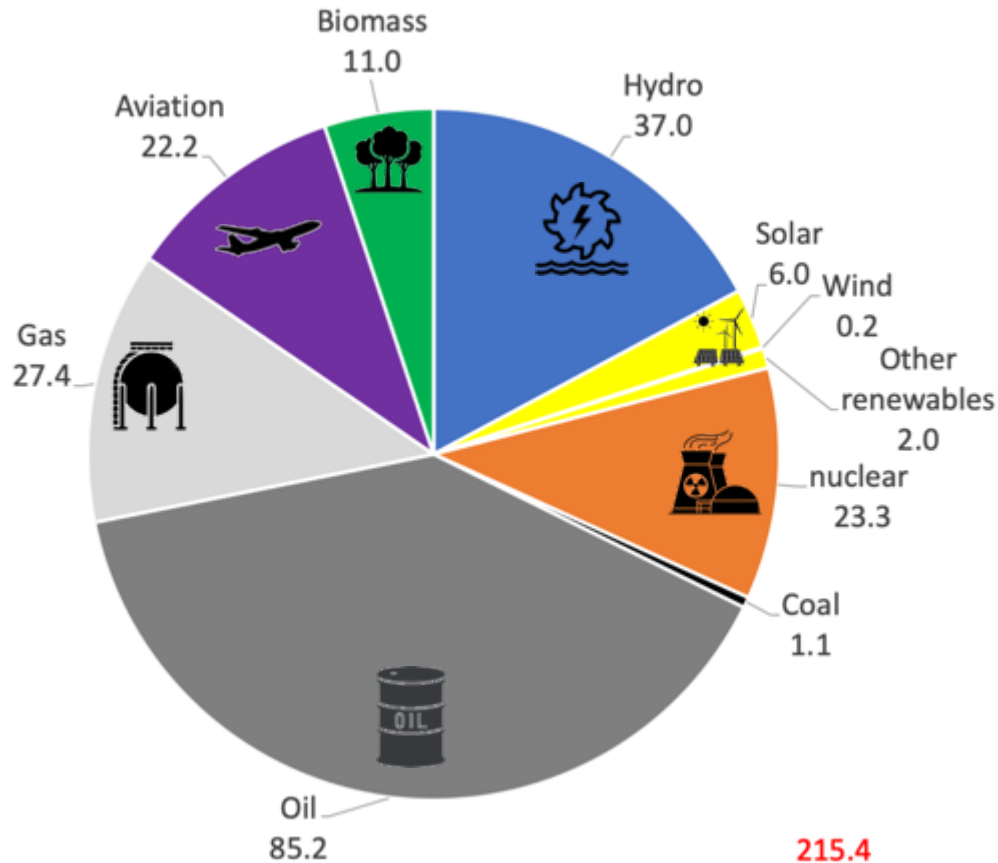
Sécurité énergétique neutre en CO₂ pour la Suisse



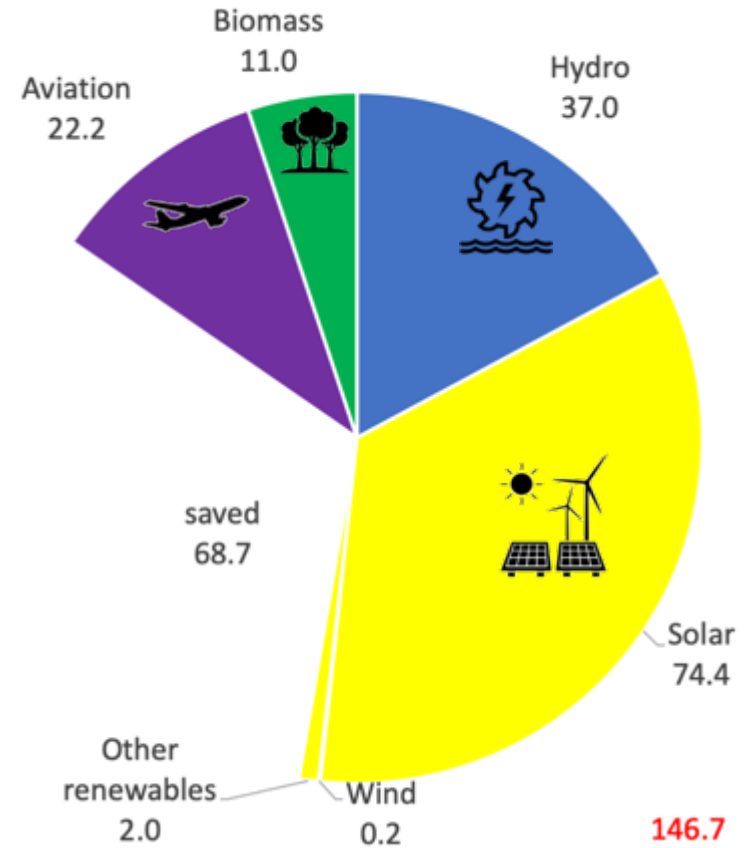
Ref.: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/teilstatistiken.html>

Demande d'énergie par source et électrification

2023



2050



Saisons en Suisse



100 W/m²

160 W/m²

100 W/m²

40 W/m²

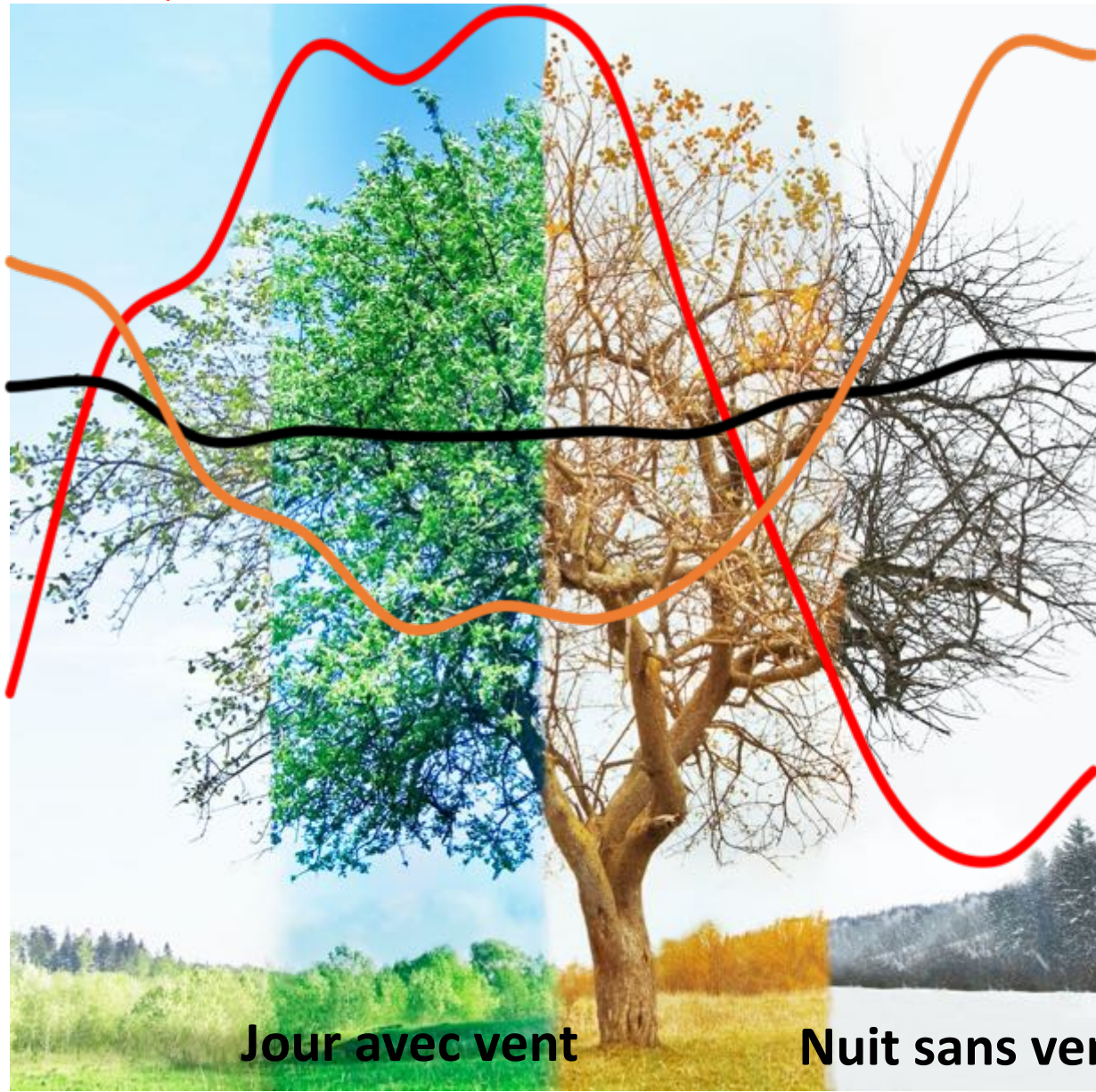


puissance
éolienne
moyenne



demande d'énergie

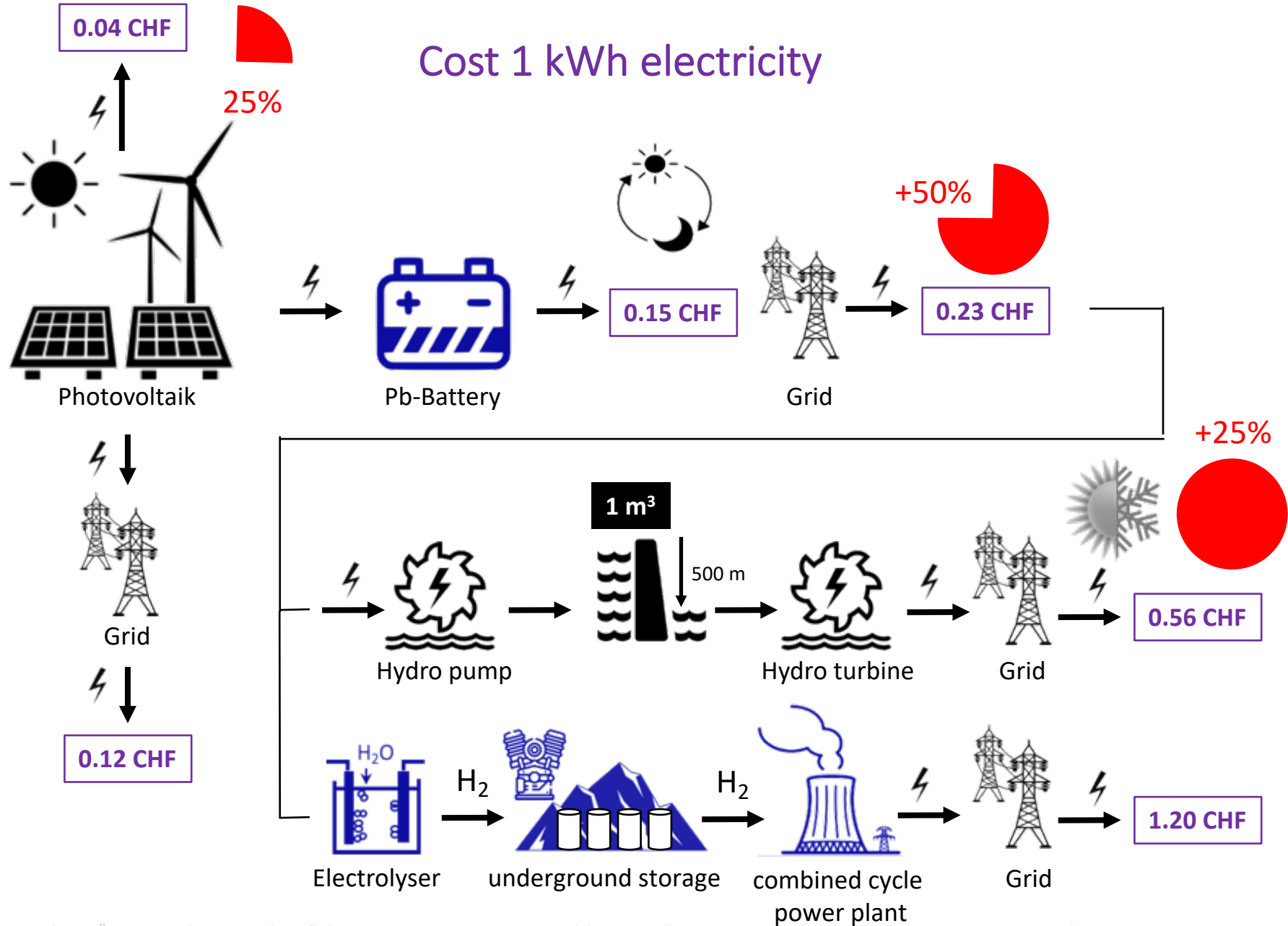
intensité solaire
moyenne









Jour avec vent

Nuit sans vent

L'électricité renouvelable entre production et consommation



Unités de centrales électriques (UCE), énergie, coût et espace

UCE's	$W_{el.} + Q$ [TWh·y ⁻¹]	LCOE [€·kWh ⁻¹]	CAPEX [G€]	OPEX [G€]	TCS [G€]	Area (PV) [km ²]	Remarques
	8.7	0.05	2	0.1	0.5	5	local, bon marché
	8.7 + 17.4	0.08	20	0.3	0.7	1	energie, compact, bon marché
	8.7 + 8.7	0.11	3	0.9	1.0	1	l'importation, fossile, CSC
	8.7 (75%)	0.13	9.6 + 6	1	1.1	100	pas suffisant, grande
	8.7 + 8.7	0.34	18	1.2	3.5	30 (4800)	l'importation, facile à stocker
	8.7 + 2.2	0.45	84	1	4.6	150	universel, très grand, cher

Uranium : 200 t d'uranium naturel (0,7 %) produisent 20 tonnes d'U (5 %), l'U naturel coûte 130 €/kg.

Batterie : 100 €/kWh, durée de vie de 8 ans

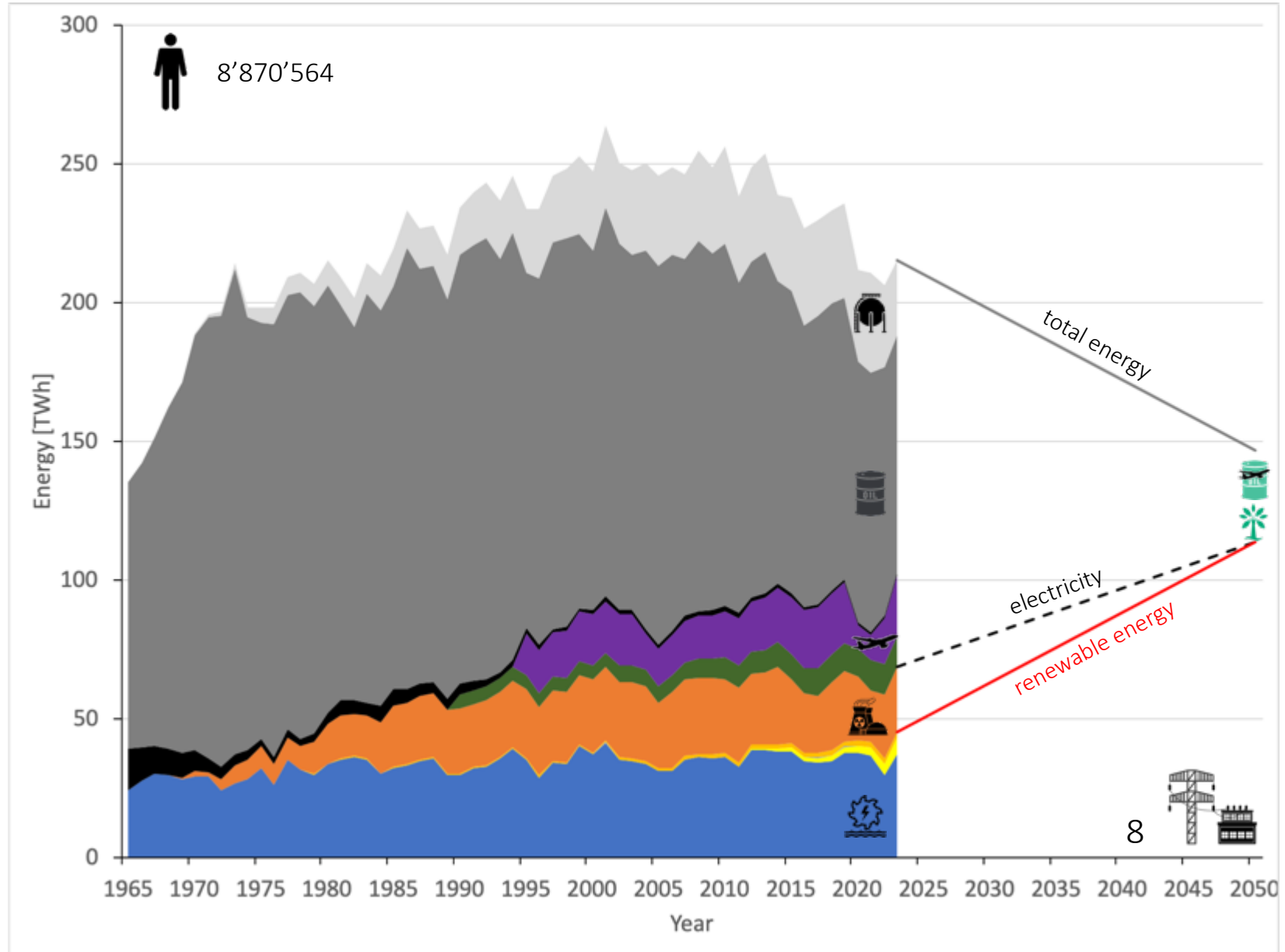
Le photovoltaïque coûte 1200 €/kWp, produit 220 kWh-m⁻²-an⁻¹, puissance de crête 1 kW-m⁻²

L'huile de palme coûte 0,7 €/L, contenu énergétique syn. huile 10 kWh/L, coût 1,7 €/L

L'hydrogène est moins de 6,7 €/kg moins cher que l'importation d'huile de palme et l'hydrogénation et moins de 2 €/kg moins cher que l'hydroélectricité.

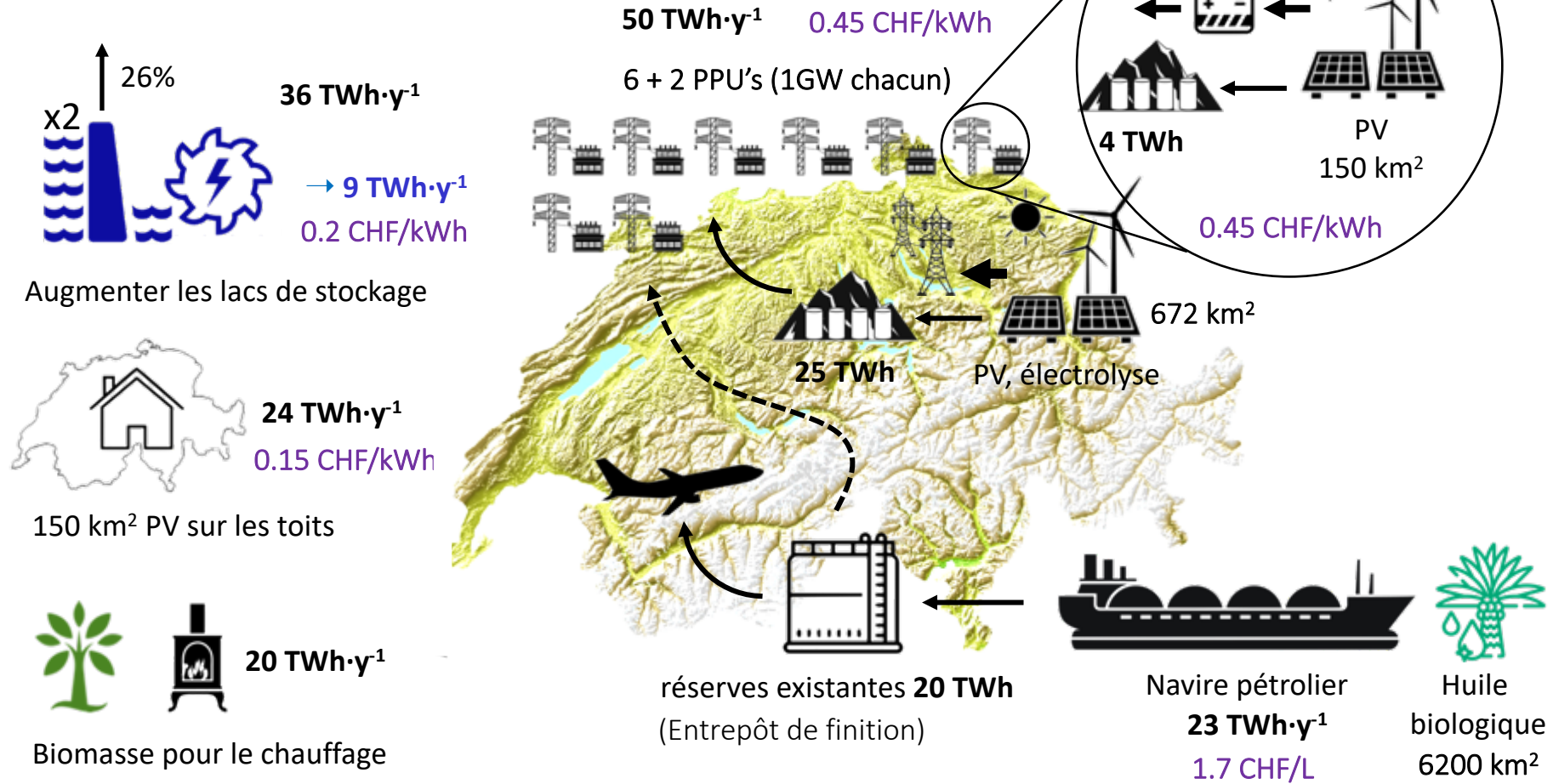
L'hydroélectricité a besoin de vallées et de différences d'altitude, l'énergie nucléaire nécessite un changement de législation, l'énergie photovoltaïque avec batterie ne couvre que 75 %, l'énergie photovoltaïque avec batterie et hydrogène est la plus chère mais la plus universelle, l'huile de palme avec hydrogénation est une importation d'un produit controversé mais facile et bon marché à stocker.

Développement des énergies renouvelables (1965 - 2050)





Solution en matière d'énergie renouvelable (exemple)



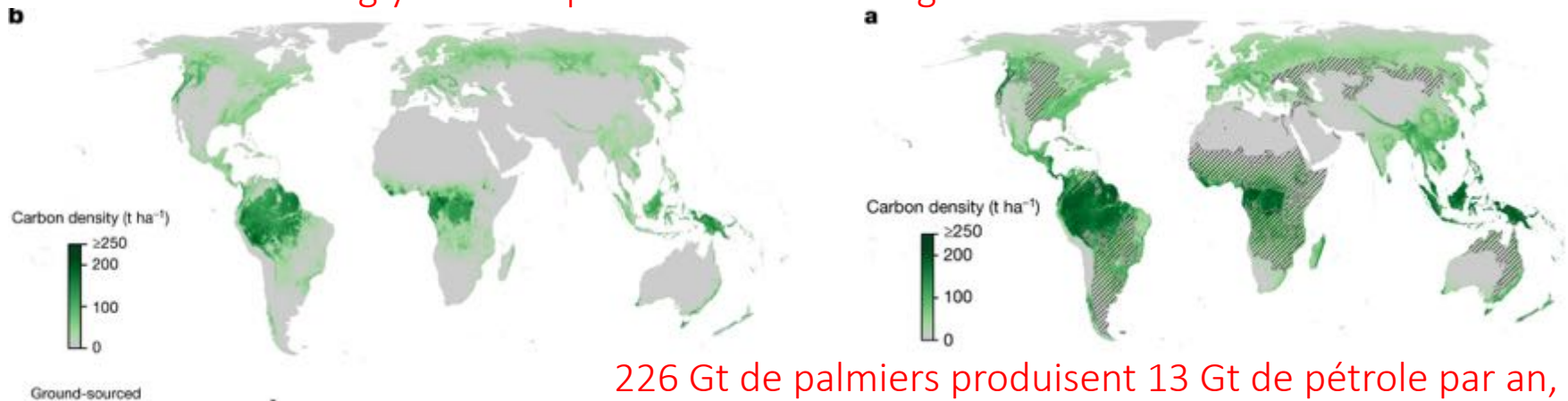
réduire la demande d'énergie par l'utilisation de la chaleur, le stockage de la chaleur, l'isolation

Puits de carbone et production d'huile de palme

À l'heure actuelle, le stockage du carbone forestier mondial est nettement inférieur au potentiel naturel, avec un déficit total de **226 Gt** (fourchette modèle = 151-363 Gt) dans les zones à faible empreinte humaine. [1]
Avec 142 troncs de palmiers à huile (TPO) disponibles par ha de plantation et une superficie replantée de 100'550 ha en 2017, le poids sec estimé des TPO ($74.48 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) générés s'élevait à un total de 7.49 Mt [2]. L'huile de palme produite est de $4,0 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ et les plantes oléagineuses sont replantées tous les 20 ans.



30 kg·y⁻¹ d'huile par arbre avec 524 kg de biomasse sèche



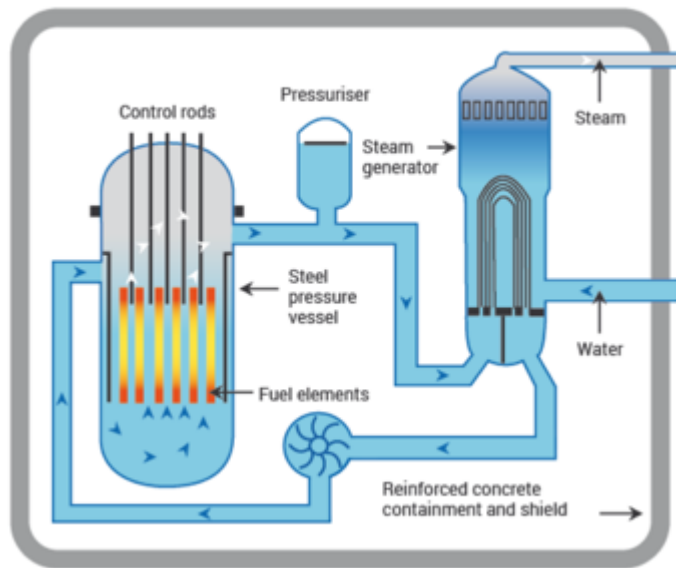
226 Gt de palmiers produisent 13 Gt de pétrole par an, soit la demande mondiale actuelle en énergie fossile.

Ref.: [1] Mo, L., Zohner, C.M., Reich, P.B. et al. Integrated global assessment of the natural forest carbon potential. Nature (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06723-z>

[2] Thiruchelvi Pulingam, Manoj Lakshmanan, Jo-Ann Chuah, Arthy Surendran, Idris Zainab-La, Parisa Foroozandeh, Ayaka Uked, Akihiko Kosugid, Kumar Sudesh "Oil palm trunk waste: Environmental impacts and management strategies", Industrial Crops & Products 189 (2022), 115827

Réacteurs nucléaires

Réacteur à fission à l'uranium



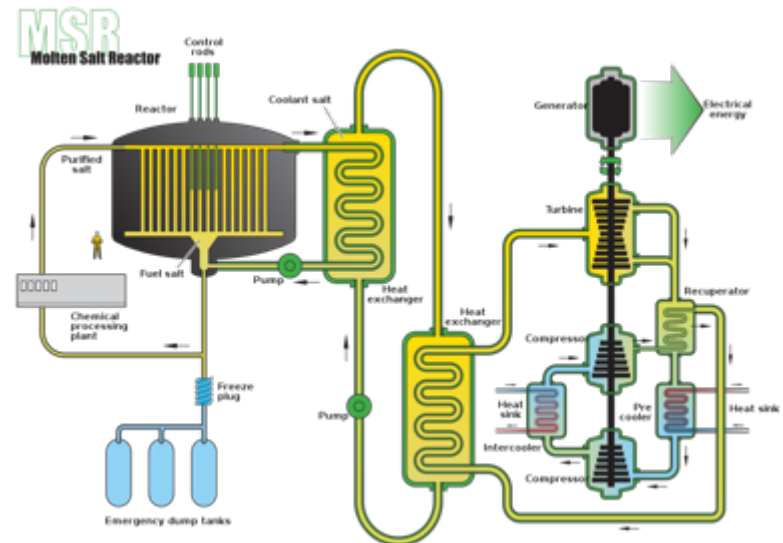
Inconvénients :

- Réserves d'uranium limitées (pour 100 ans)
- Risque de fusion du cœur du réacteur
- Isotopes à longue durée de vie (Pu)
- faible rendement (25 %)
- utilisation limitée de la chaleur
- Dépôt final de la Nuc. Déchets
- Petits réacteurs modulaires (SMR)

L'avenir



Réacteur à sels fondus au thorium

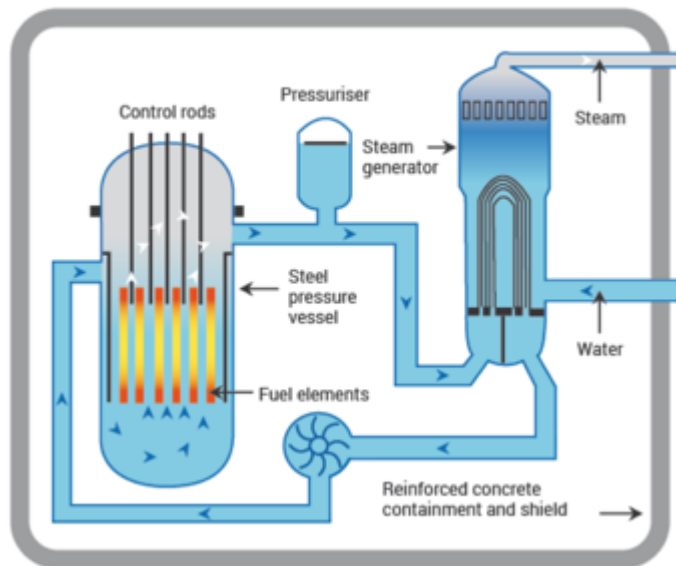


Avantages :

- Grandes réserves de thorium (utilisation des déchets nucléaires, 95 % sont des combustibles)
- Pas de fusion possible du cœur du réacteur
- Pas d'isotopes à longue durée de vie
- T plus élevé, rendement plus élevé (> 25 %)
- Utilisation de la chaleur pour le chauffage
- Réacteur à sels fondus (MSR)

Réacteurs nucléaires

Réacteur à fission à l'uranium



Inconvénients :

Réserves d'uranium limitées (pour 100 ans)

Risque de fusion du cœur du réacteur

Isotopes à longue durée de vie (Pu)

faible rendement (25 %)

utilisation limitée de la chaleur

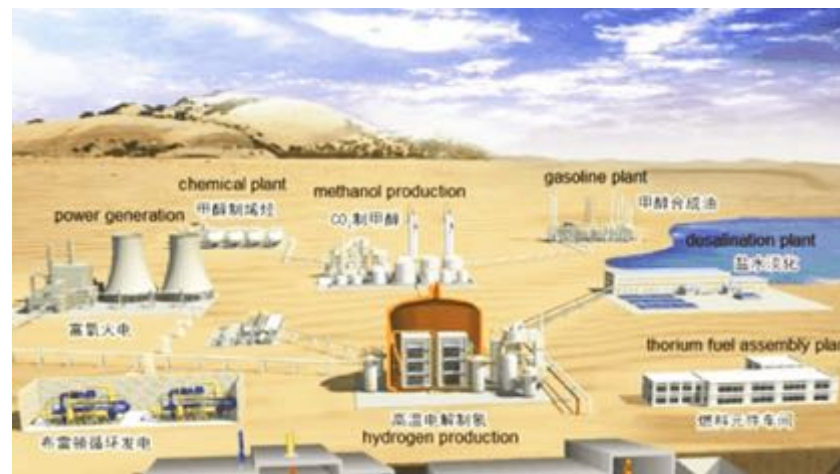
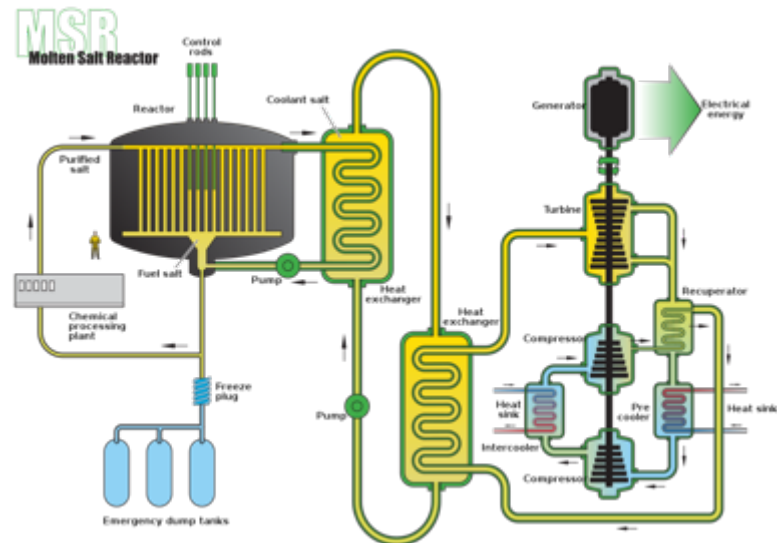
Dépôt final de la Nuc. Déchets

Petits réacteurs modulaires (SMR)

L'avenir

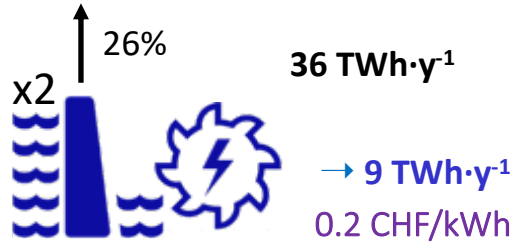


Réacteur à sels fondus a reproduction (Th)

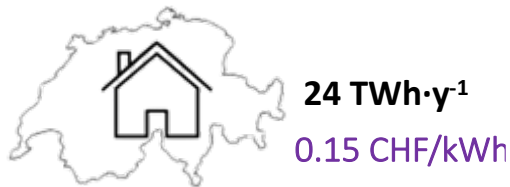


TMSR-LF1 (2 MW_{therm.}) construction 2018 - 2023, Wuwei city, Gansu province, China, operated since July 2023

Solution neutre en CO₂ (exemple)



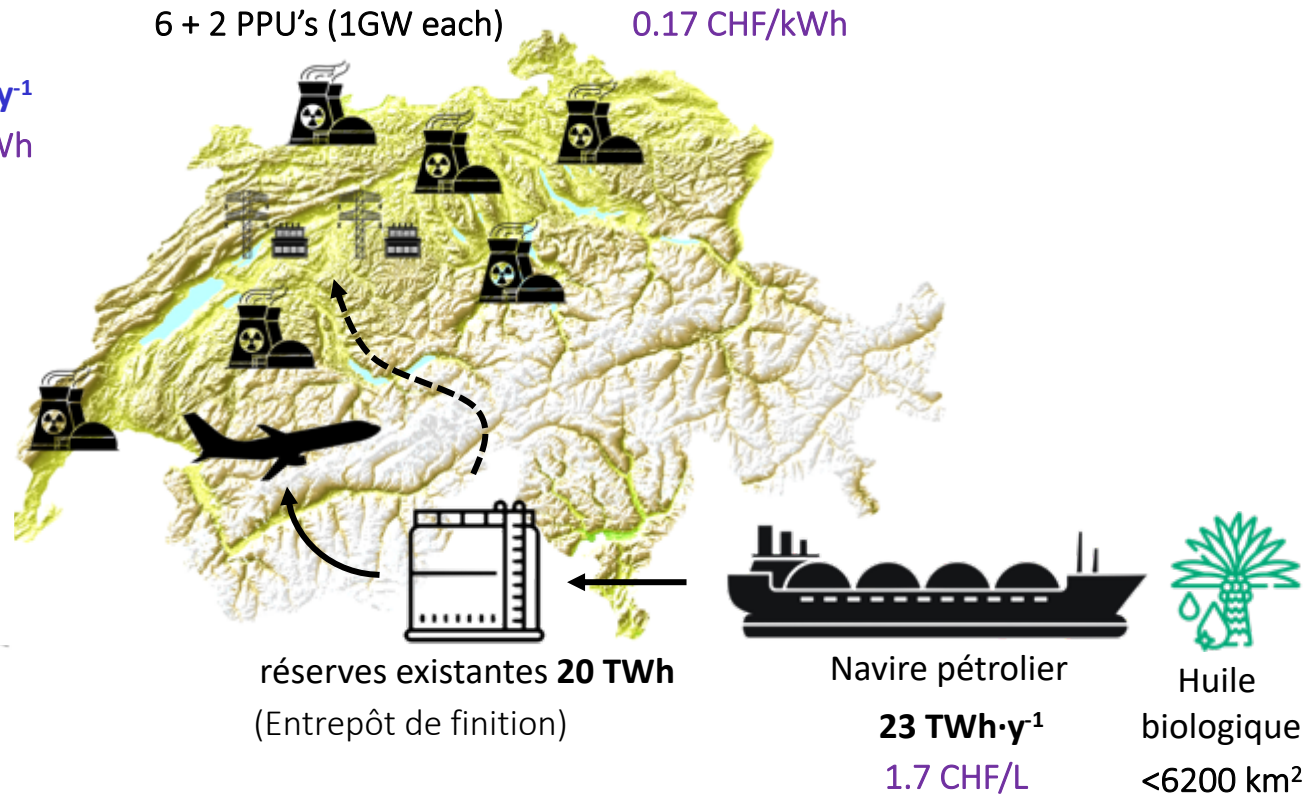
Augmenter les lacs de stockage



150 km² PV sur les toits

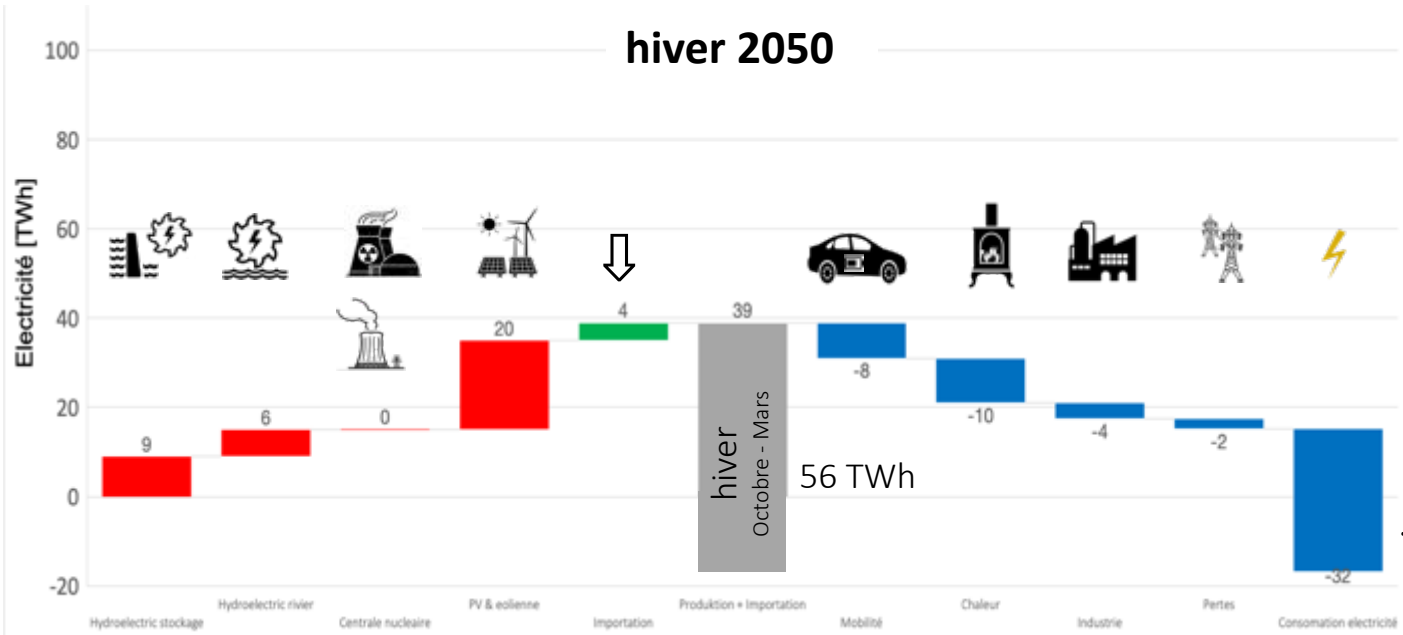
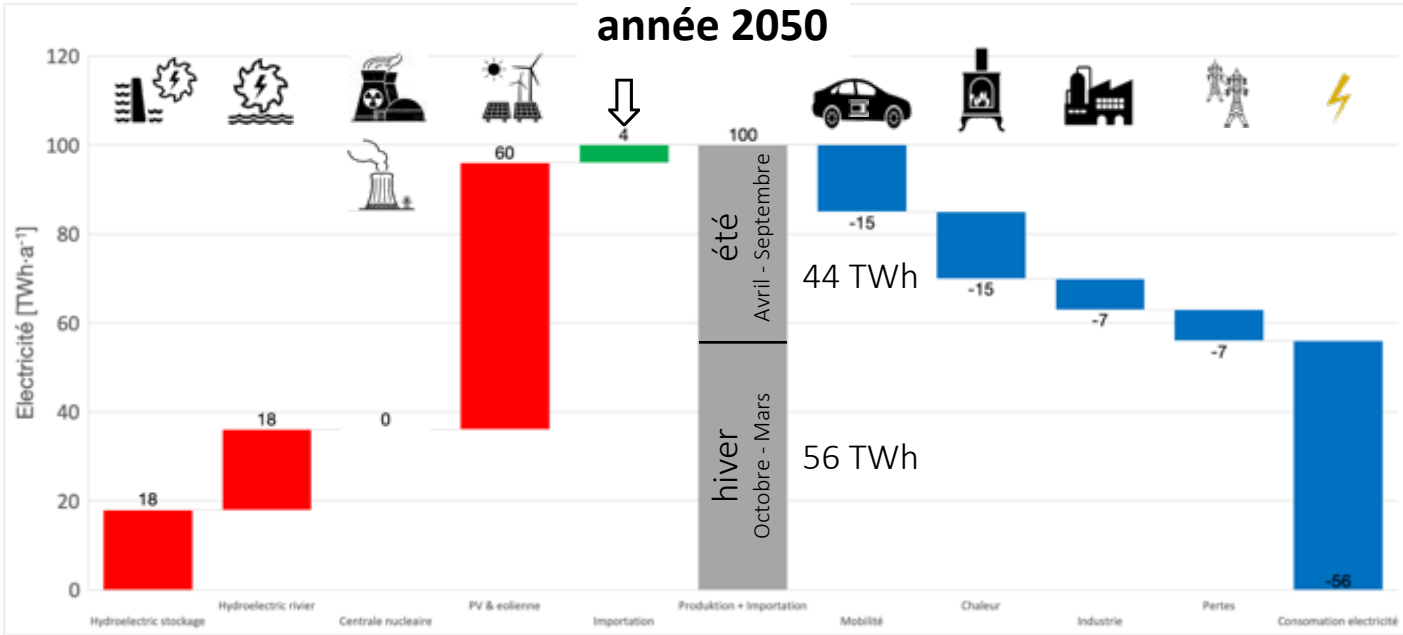


Biomasse pour le chauffage





“Winterstromlücke”



-17 TWh



Trois option pour éviter la “Winterstromlücke”

System energetic	PV, H ₂ Stockage	PV Importation	Centrale nucléaire
Extension PV ou énergie éolienne [TWh]	61	37	1
Extension centrale nuc. ou therm.	0	0	6 + 2 ou 8
Stockage/Importation [TWh]	16	24	0
Investissement initial [GCHF]	302	66	37
coût total [GCHF/an]	16.8	4.4	3.2
coûts de l'électricité [CHF/MWh]	560	>300	50
Remarques	Redondance, réserves	Pas de redondance, pas de réserves	redondance, >0.5 ans réserves

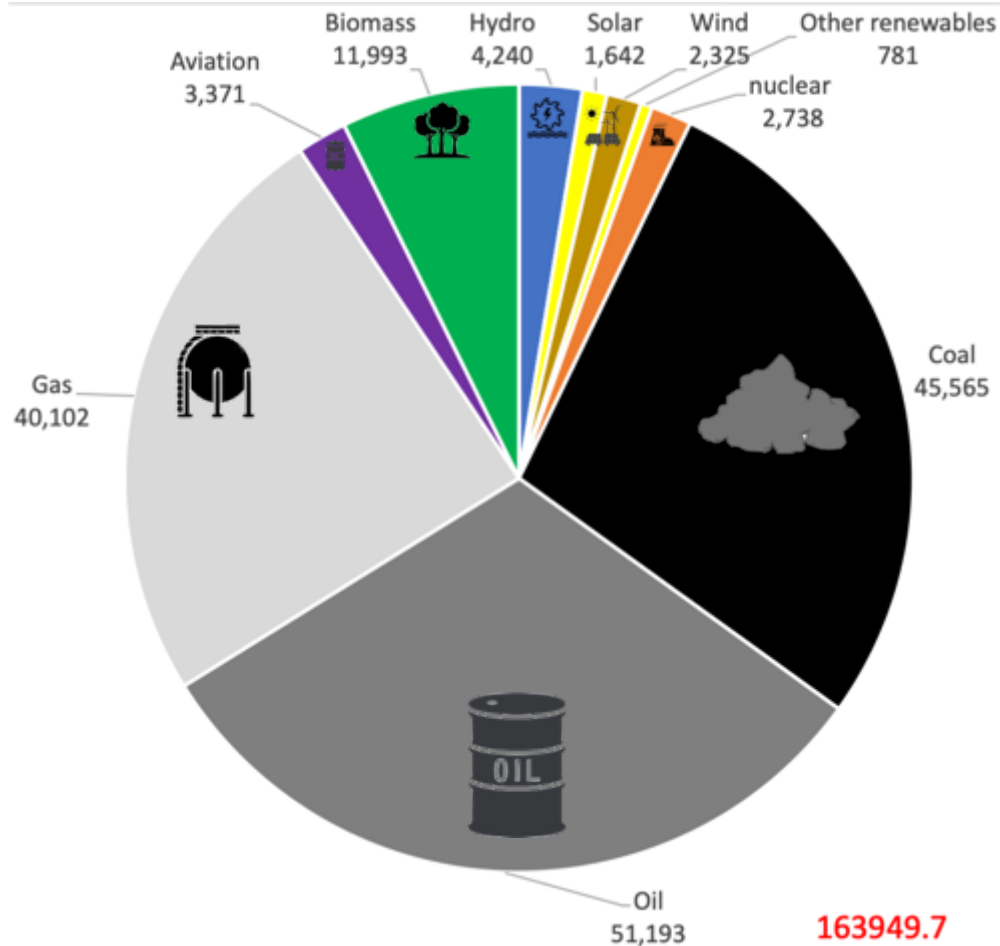


Transition énergétique mondiale

Energy in [TWh·y⁻¹]

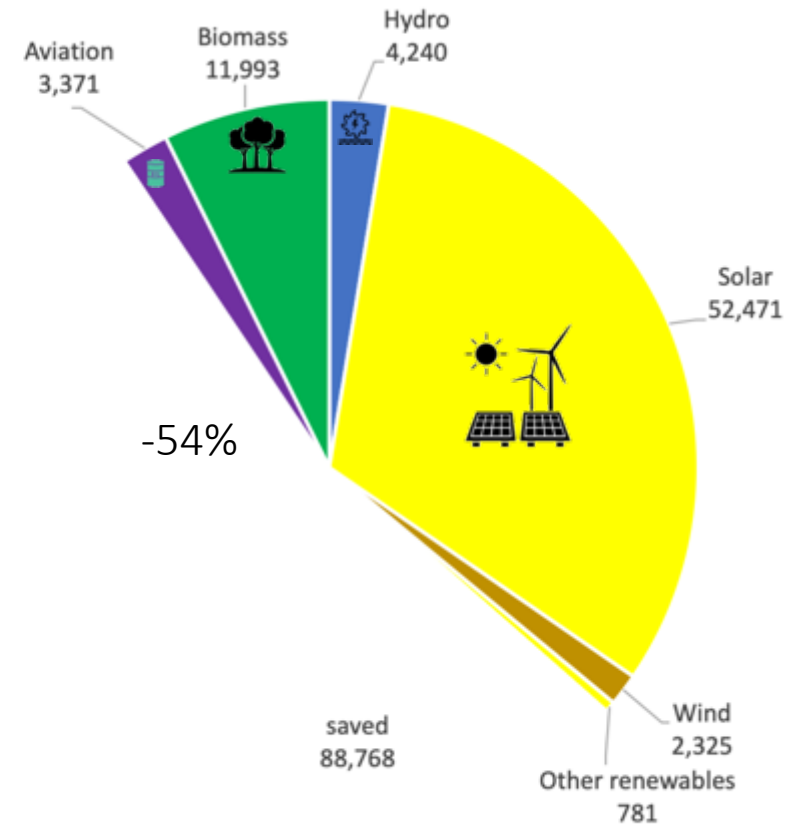
current
2023

electrification
2050



163949.7

18.7 TW

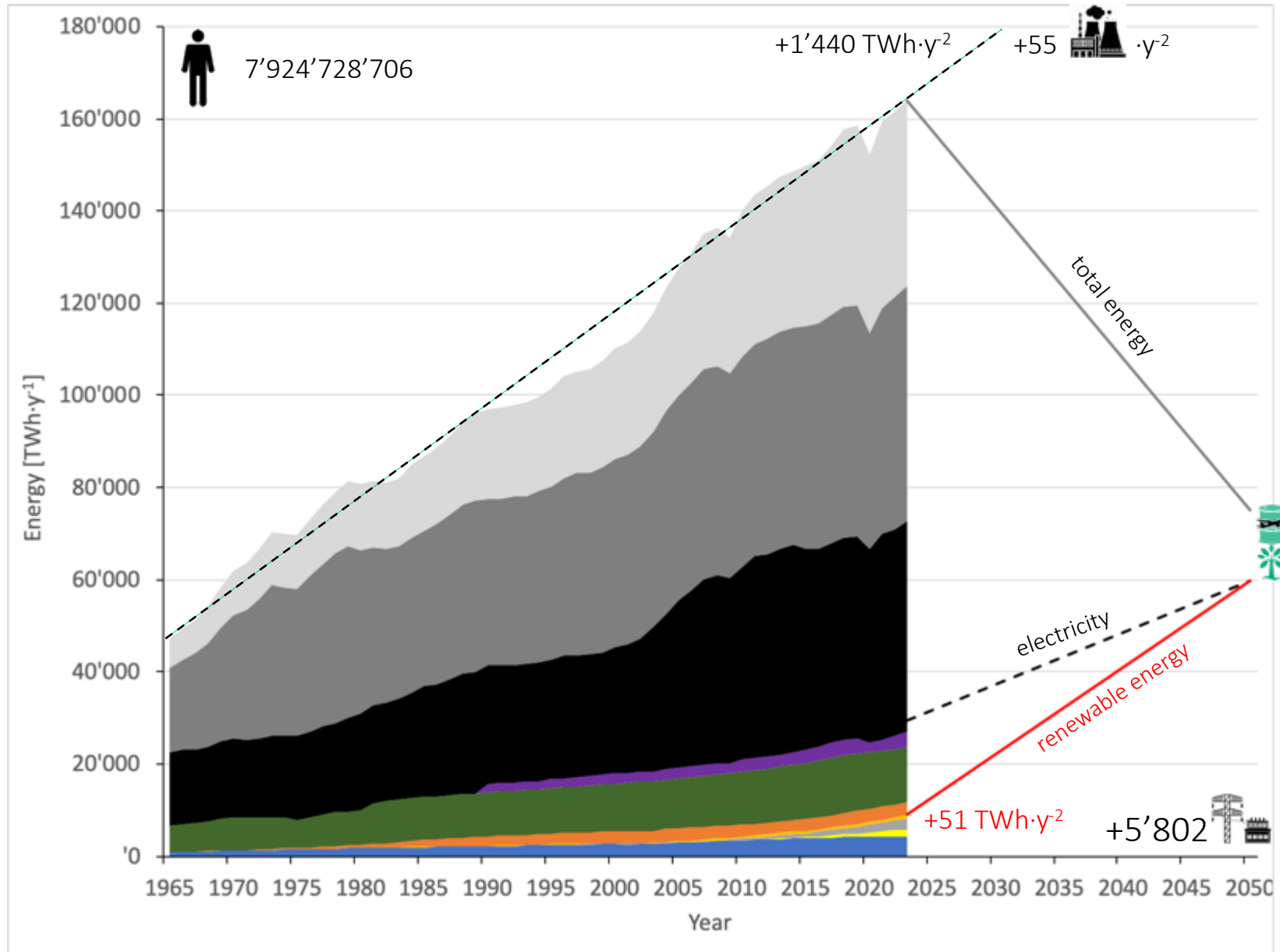


75182.1

8.6 TW



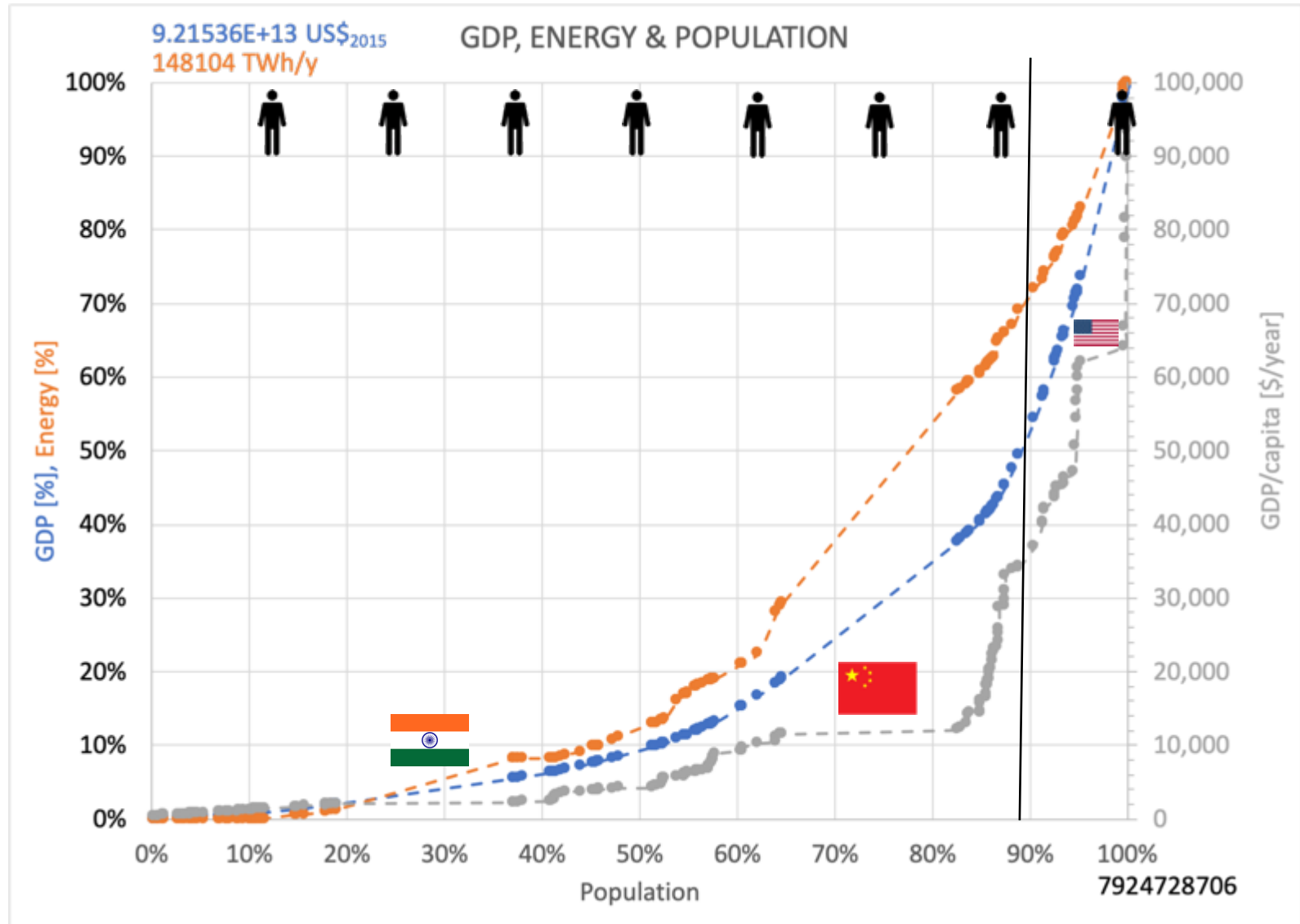
Développement énergétique mondial







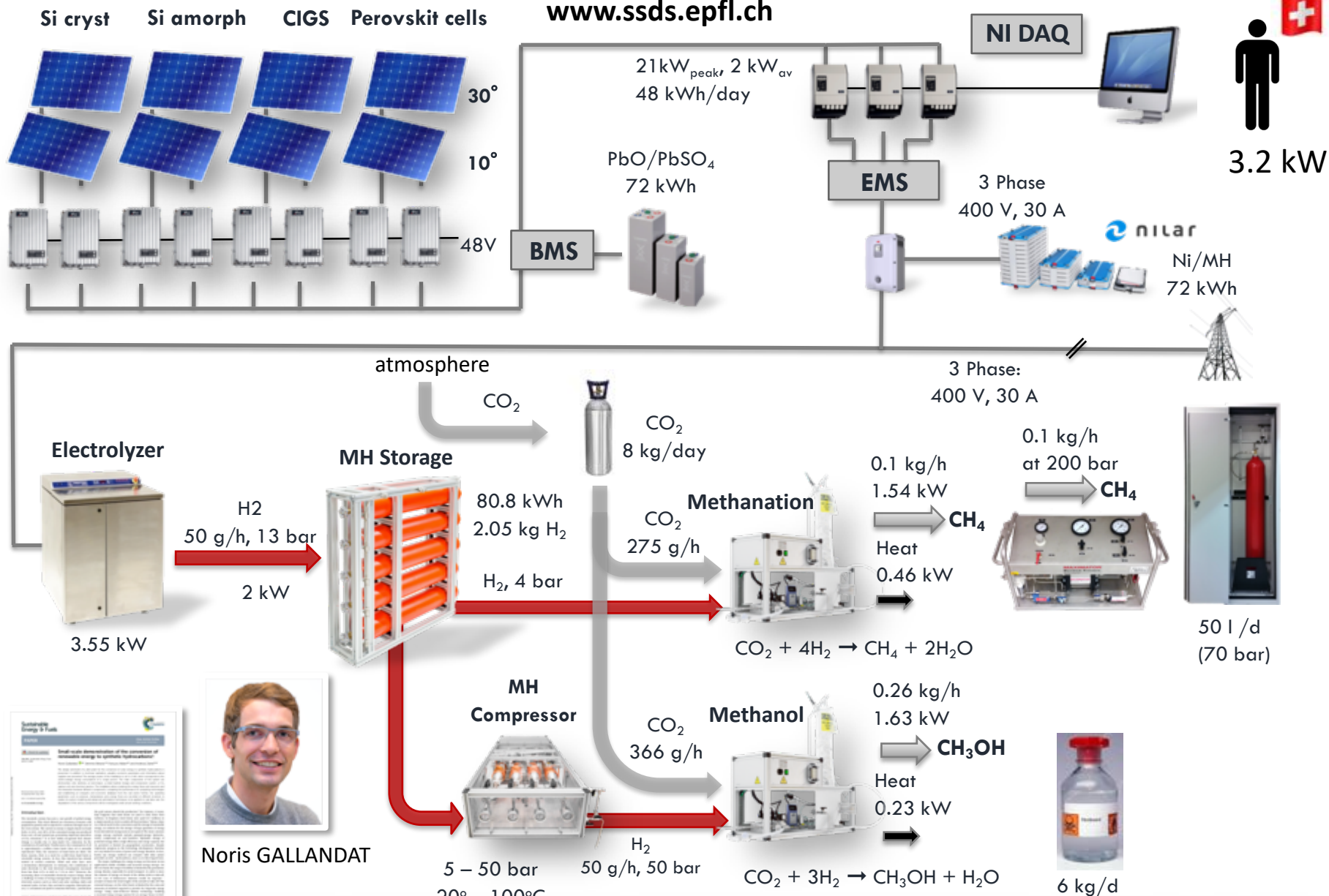
Transition énergétique mondiale : population, PIB, énergie



Ref.: <https://ourworldindata.org/grapher/energy-use-per-person-vs-gdp-per-capita>

Démonstrateur à petite échelle Sion (SSDS)

www.ssds.epfl.ch



Noris GALLANDAT

Noris Gallandat, Jérémie Bérard, François Abbet and Andreas Züttel, "Small-scale demonstration of the conversion of renewable energy to synthetic hydrocarbons", Sustainable Energy & Fuels (2017). DOI: 10.1039/c7se00275k, rsc.li/sustainable-energy

Publication 2024

Frontiers in Energy Research: Process and Energy Systems Engineering

MT: final version

CO₂ Neutral Energy Security for Switzerland

Andreas ZÜTTEL^{*✉}, Christoph NÜTZENADEL[†], Louis SCHLAPBACH[‡], Paul W. GILGEN[§][✉] Laboratory of Materials for Renewable Energy (LMER), Institute of Chemical Sciences and Engineering (ISIC), École Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL Valais/Wallis, 1950 Sion Switzerland.[†] Empa Materials Science and Technology, 8600 Dübendorf, Switzerland.[‡] Christoph Nützenadel AG, Turbinenstrasse 60, CH-8005 Zürich, Switzerland[§] Emeritus Empa & ETH Zürich & Université de Fribourg, Switzerland.[¶] Formerly Empa Materials Science and Technology, 8600 Dübendorf, Switzerland.

ABSTRACT

An analysis of the technical opportunities and economic consequences of the transition from fossil fuels to renewable energy in Switzerland is presented. The technically realized efficiencies showed that complete electrification leads to the most efficient energy system and cheapest electricity. The electricity demand is expected to almost double, and the overall energy cost will increase by 20% compared to 2019. However, the technical challenges of seasonal electricity storage, without any reserves and redundancy, amounts to 20 TWh.

Hydropower and PV without storage produce the cheapest electricity. Future nuclear fission technologies, e.g. molten salt Thorium breeding reactor - currently still in an experimental stage – might become the most economical and least environmental impact solution for CO₂ neutral continuous electricity production. The opportunities for a massive increase of hydroelectric production are limited, already shifting the use of water (9 TWh) from summer to winter is a great challenge. PV and hydrogen production in Switzerland have the advantage to provide approximately 75% of the electricity without seasonal storage leading to significantly lower electricity cost than from imported hydrogen or synthetic hydrocarbons. The most economical solution for aviation and reserves is imported bio-oil converted to synthetic Kerosene, for which large storages already exist.

Highlights

- Renewable energy on demand is essential for replacing fossil fuels and can be realized by combining intermittent energy supplies like photovoltaic and wind with battery and seasonal storage in a power plant unit.
- Importing renewable energy carriers requires a storage capacity similar to the seasonal storage for domestic production of renewable energy.
- Renewable energy production in Switzerland with seasonal storage and importing renewable energy carriers is a technical and economic challenge, respectively.
- The fuel for aviation and the energy reserves for the power plant units can be realized with synthetic oil produced by hydriding bio-oil, avoiding the need for new large and expensive storage systems and CO₂ capture from the atmosphere.
- Thermal power plants fueled with renewable energy carriers provide equal amounts of electricity and heat. Both forms of energy are of high value in the wintertime.

Keywords: renewable energy, energy storage, cost of energy, power plant units, CO₂ free, nuclear

Word count 12'881 Words

*Correspondence: andreas.zuettel@epfl.ch

Andreas ZÜTTEL

22 May 2024

1 / 28



Prof. Dr. Andreas ZÜTTEL



Dr. Christoph NÜTZENADEL



Prof. Dr. Louis SCHLAPBACH



Mr. Paul W. GILGEN

Andreas ZÜTTEL, Christoph NÜTZENADEL, Louis SCHLAPBACH, Paul W. GILGEN “CO₂ Neutral Energy Security for Switzerland”, Frontiers in Energy Research: Process and Energy Systems Engineering, ? (2024), <https://doi.org/10.3389/fenrg>.

www.lmer.epfl.ch

La Winterstromlücke au-delà des polémiques

Le changement climatique se traduit par une augmentation de la température moyenne et est en grande partie attribué à la concentration accrue de CO₂ dans l'atmosphère. Il est donc essentiel de réduire considérablement les émissions mondiales de CO₂ et de les ramener à zéro d'ici 2050. Pour remplacer les combustibles et carburants fossiles par des énergies renouvelables, un nouveau concept basé sur des unités de production d'électricité capables de fournir de l'énergie renouvelable à la demande et d'au moins 1 GW est présenté. Les rendements techniques réalisés montrent qu'une électrification complète conduit au système énergétique le plus efficace et à l'électricité la moins chère. On s'attend à ce que la demande en électricité double environ et que les coûts énergétiques totaux augmentent de 20% par rapport à 2023. Cependant, les défis techniques liés au stockage saisonnier de l'électricité sans aucune réserve ni redondance s'élèvent à environ 17 TWh. L'énergie hydraulique et le photovoltaïque sans stockage produisent l'électricité la moins chère. Les futures technologies de fission nucléaire, telles que le réacteur à thorium et sel fondu, qui en est encore au stade expérimental, pourraient constituer la solution la plus économique et la plus respectueuse de l'environnement pour une production d'électricité continue et neutre en CO₂. Les possibilités d'augmenter massivement la production d'énergie hydraulique sont limitées, le simple transfert de l'utilisation de l'eau (9 TWh) de l'été vers l'hiver représentant déjà un défi de taille. La production photovoltaïque et hydraulique en Suisse présente l'avantage de pouvoir fournir environ 75% de l'électricité sans stockage saisonnier, ce qui se traduit par des coûts d'électricité nettement inférieurs à ceux de l'hydrogène importé ou des hydrocarbures synthétiques. La solution la plus économique pour l'aviation et les réserves est le biocarburant importé, qui est transformé en diesel et en kérosène synthétiques et pour lequel il existe déjà de grands réservoirs de stockage. La transition énergétique mondiale est examinée à la fin et discutée en relation avec les besoins énergétiques et la performance économique.

Ref.: Andreas ZÜTTEL, Christoph NÜTZENADEL, Louis SCHLAPBACH, Paul W. GILGEN "Power plant units for CO₂ Neutral Energy Security in Switzerland", *Frontiers in Energy Research: Process and Energy Systems Engineering*, 12:1336016 (2024), [https://doi:10.3389/fenrg.2024.1336016](https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1336016)

CV Andreas ZÜTTEL, Prof. Dr.

Born 22. 8. 1963 in Bern, Switzerland. 1985 Engineering Degree in Chemistry, Burgdorf, Switzerland. 1990 Diploma in Physics from the University of Fribourg (UniFR), Switzerland. 1993 Dr. rer. nat. from the science faculty UniFR. 1994 Post Doc with AT&T Bell Labs in Murray Hill, New Jersey, USA. 1997 Lecturer at the Physics Department UniFR. 2003 External professor at the Vrije Universiteit Amsterdam, Netherlands. 2004 Habilitation in experimental physics at the science faculty UniFR (www.unifr.ch). President of the Swiss Hydrogen Association „HYDROPOLE“ (www.hydropole.ch). 2006 Head of the section “Hydrogen & Energy” at EMPA (www.empa.ch) and Prof. tit. in the Physics department UniFR. 2009 Guest Professor at IMR, Tohoku University in Sendai, Japan. 2012 Visiting Professor at Delft Technical University, The Netherlands, 2014 Full Professor for Physical Chemistry, Institut des Sciences et Ingénierie Chimiques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL (www.lmer.epfl.ch), Switzerland. 2017 Co-Founder of GRZ Technologies Ltd. (www.grz-technologies.com). 2020 Member of the Swiss Academy of Technical Science (SATW, <https://www.satw.ch>)



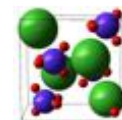
A. Züttel



BSc Chemistry
HTL Burgdorf



Int. Symposium
Hydrogen & Energy
since 2007



Borohydrides
2000



MH Storage
2004



Start Up Company
2017 Grolley (FR)
grz-technologies.com

Google scholar: Andreas ZÜTTEL; researcherID.com: F-5117-2015; orcid.org/0000-0002-5708-1855.

Total Publications: 432, h-index: 80, Citations: 40'577



Andreas ZÜTTEL, Prof. Dr.

Laboratory of Materials for Renewable Energy (LMER)
Institute of Chemical Sciences and Engineering (ISIC)
Basic Science Faculty (SB)
École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) Valais/Wallis
Rue de l'Industrie 17, CP 440
CH-1951 Sion, Switzerland

e: andreas.zuettel@epfl.ch
m: +41 79 484 2553
T: +41 21 695 8304 (Secretary)
U: <http://lmer.epfl.ch>

