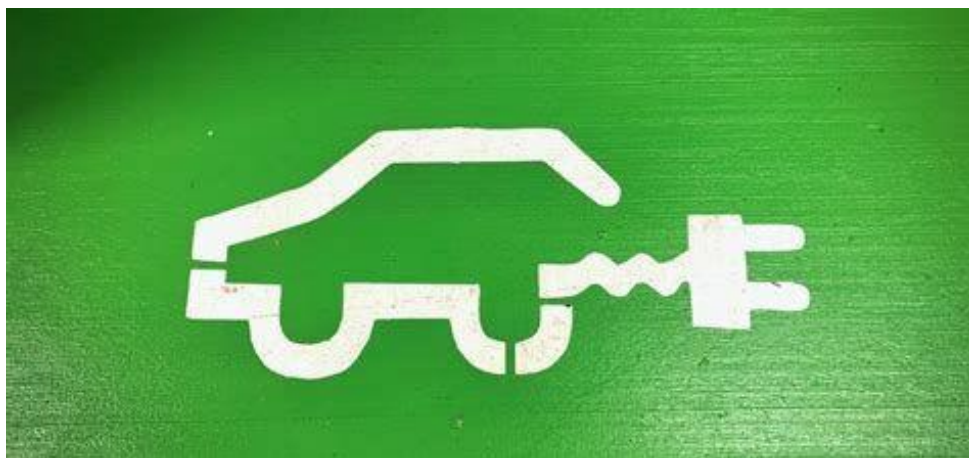


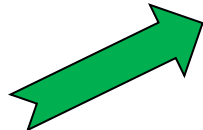
Transition énergétique et Technologies de l'information



Quelques sigles

■ EnR	Energie Renouvelable
■ GES	Gaz à Effet de Serre
■ PV	Photo Voltaïque
■ SNBC	Stratégie Nationale Bas-Carbone
■ TE	Transition Energétique
■ TIC	Technologies de l'Informatique et des Communications

TIC et énergie

- 
- Intro
 - Consommation des TIC
 - Le système électrique
 - Les outils TIC



Très nombreuses études officielles « systémiques »



Présentation de la programmation pluriannuelle de l'énergie et de la stratégie nationale bas carbone



MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET SOLIDAIRE



Vers un mix électrique
100% renouvelable en 2050



Conditions et prérequis en matière de faisabilité technique pour un système électrique avec une forte proportion d'énergies renouvelables à l'horizon 2050

TIC et transition énergétique (TE)

- Traditionnellement, on distingue courants forts et courants faibles
- Les TIC sont un outil important de la TE
- Mais poids croissant des TIC dans la consommation énergétique (**courants faibles pas si faibles que ça!**)

→ Bilan énergétique des TIC ?

Le système électrique au cœur de la TE

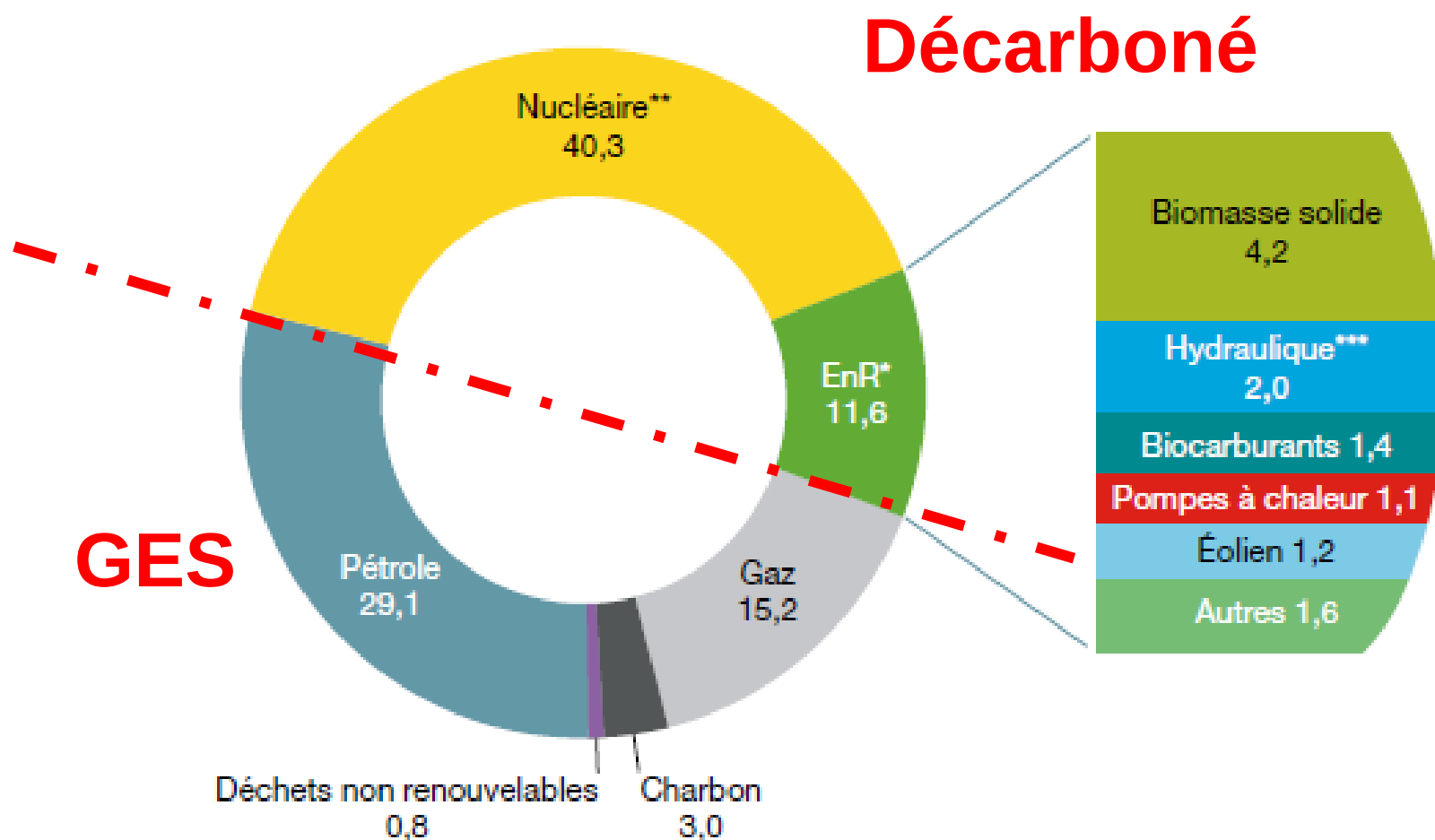
- Le système électrique est un **acteur majeur** pour la TE:
 - Production progressivement **décarbonée**
 - Outil de décarbonation des **usages** (en priorité les transports, via les batteries et le H2 vert)
- Les TIC sont un outil important pour la TE du système électrique

Sources primaires d'énergie

RÉPARTITION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE EN FRANCE

TOTAL : 245 Mtep en 2019 (données brutes)

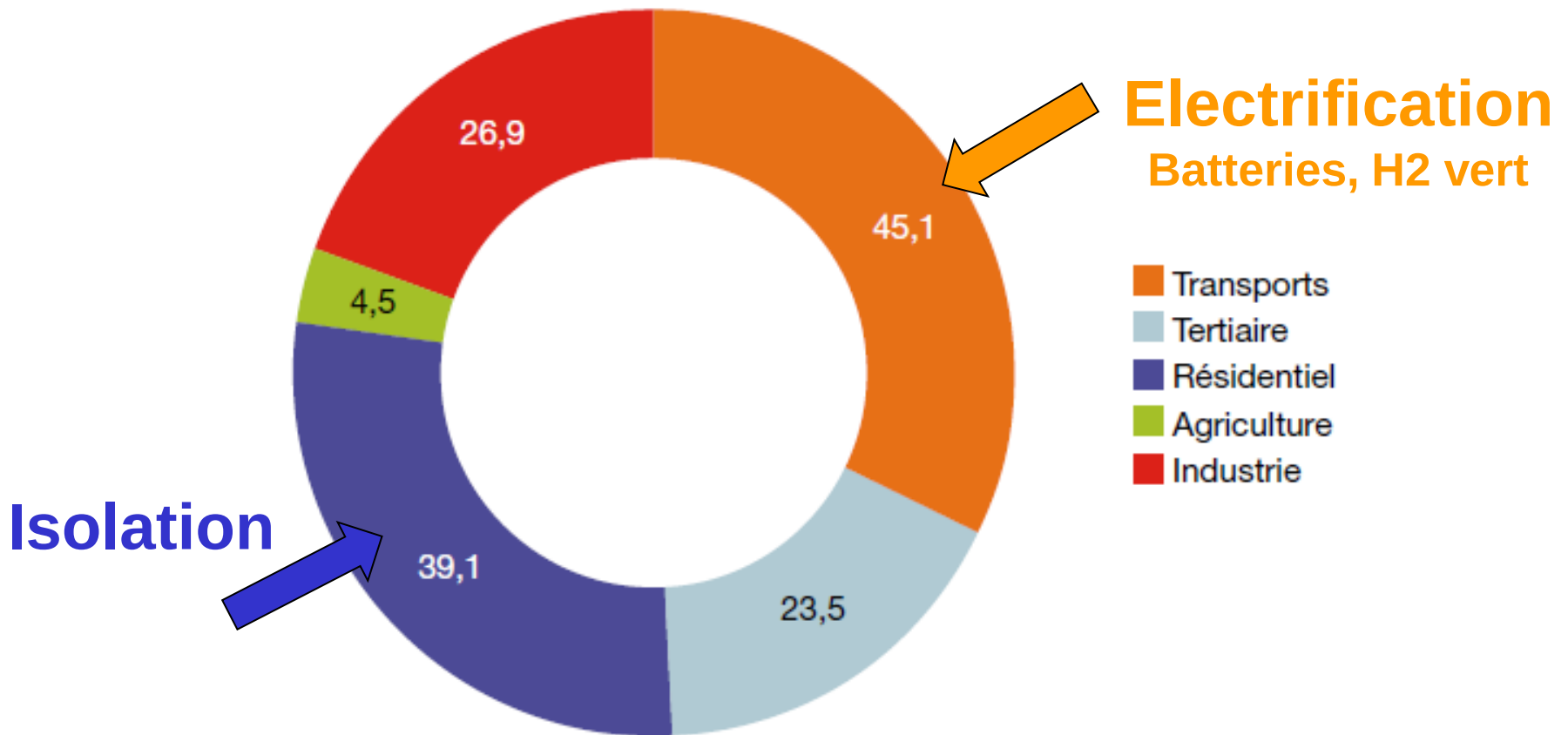
En % (données non corrigées des variations climatiques)



Consommation d'énergie par secteur

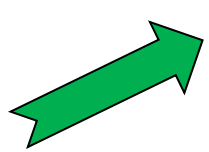
CONSOMMATION FINALE ÉNERGÉTIQUE PAR SECTEUR EN FRANCE

TOTAL en 2019 : 139,1 Mtep (données réelles, non corrigées des variations climatiques)



TIC et énergie

- Intro



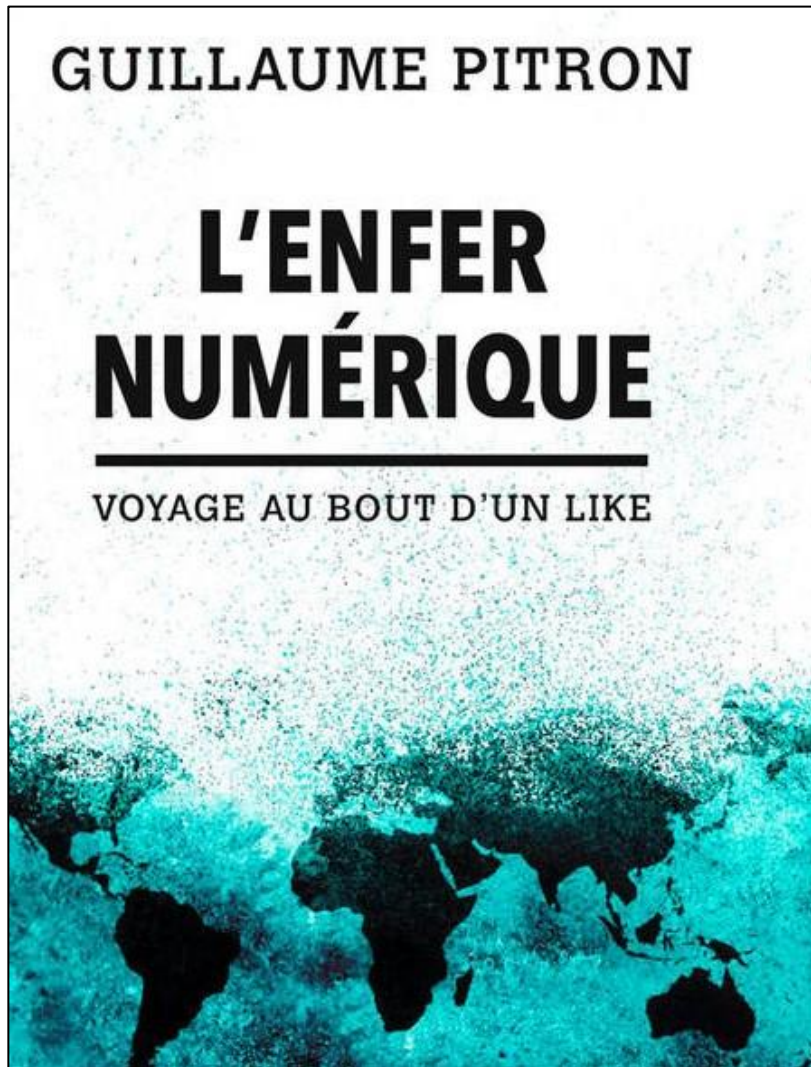
- **Consommation des TIC**

- Le système électrique

- Les outils TIC



Coût écologique des TIC

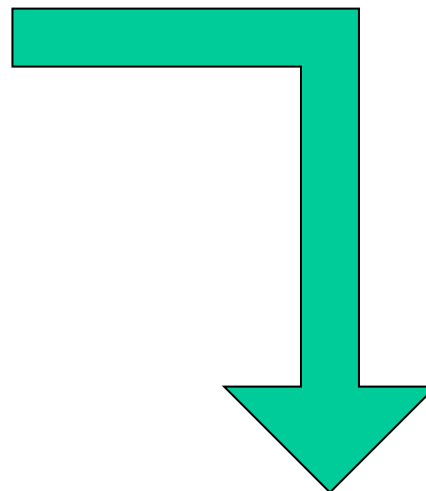


- Evaluation difficile du % des TIC dans la consommation énergétique mondiale mais forte croissance
- importance de la fabrication de équipements
- Si Internet était un pays, il serait le 3eme consommateur d'électricité mondial (après la Chine et les USA)

Consommation des T.I.C.

FABRICATIONS	45%
EXPLOITATION	55%

La fabrication et le renouvellement des équipements a un poids important.



TERMINAUX	19%
DATA CENTERS	20%
RESEAUX	16%

Source: shift project

Quelques estimés 2019 du numérique

- Entre 15 et 34 milliards d'équipements terminaux répartis entre 4,4 milliards d'utilisateurs dans le monde
- Le numérique (**en prenant en compte le cycle de vie des équipements**):
 - serait responsable de 4 à 10 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre
 - aurait consommé 10 à 15 % de l'électricité mondiale

Le coût du clic (et du like)

Quelques coûts énergétiques:

- 1 requête google = 1 ampoule 12w x 2h
- 1 photo par @mail = 500m en voiture
- Box allumées 24h/24: 6,5Twh/an, équivalent d'une tranche nucléaire

Grands consommateurs:

- Video et streaming, téléconférences
- En croissance: **blockchain, IOT**
- Cloud et Data Centers
- Obsolescence programmée des équipements

TIC source d'économie ?

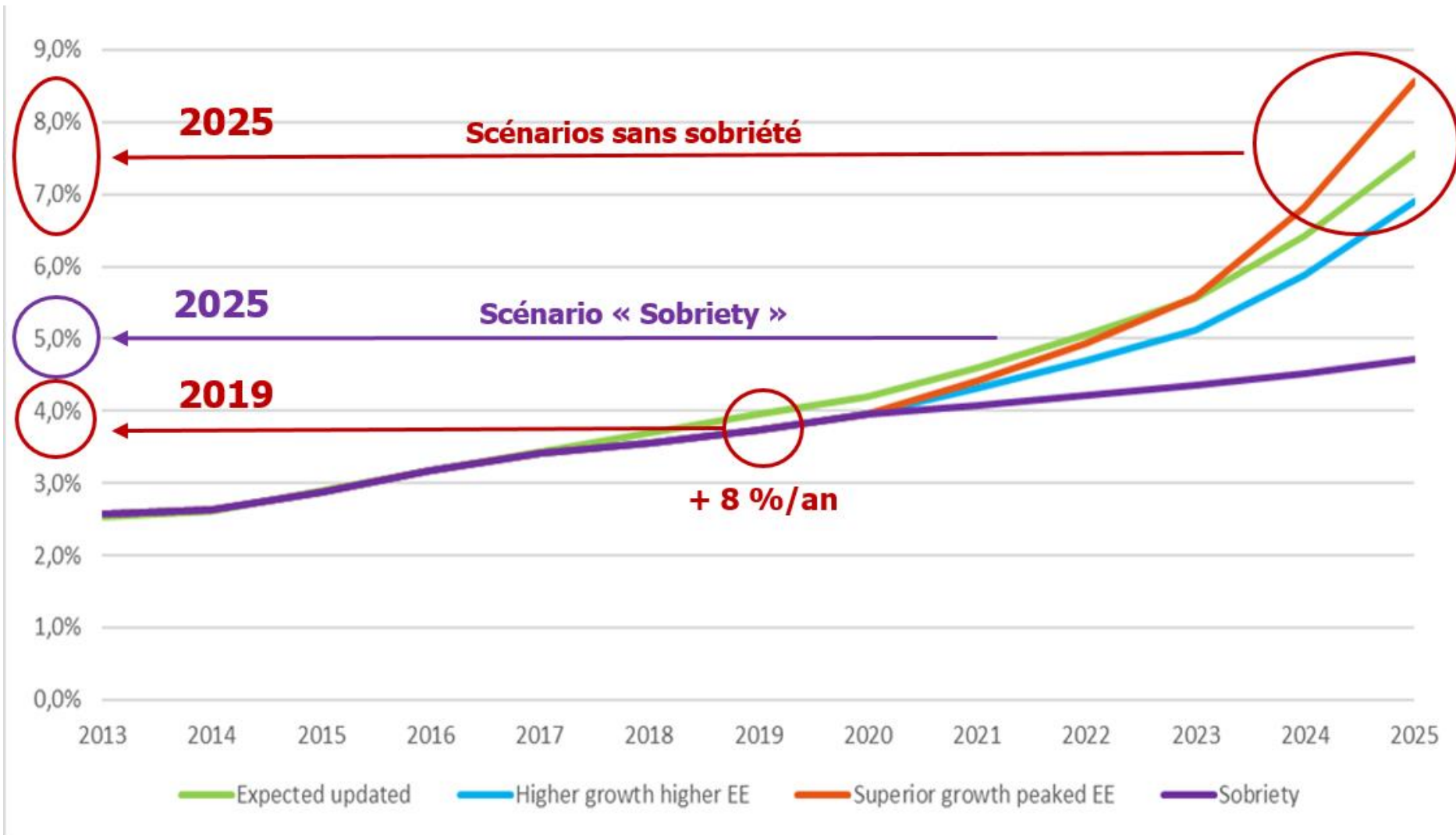
■ TIC, substitution aux transports ?

- Télé travail / Télé enseignement /
Télé market / Télé truc

■ Mais:

- Le numérique émet déjà plus de GES que le transport aérien
- Effet « rebond », les progrès des TIC encouragent les nouveaux usages:
 - Addiction à l'immédiateté
 - IOT
 - ...''*porno dans l'ascenseur*''

Part du numérique dans les GES ?



Source: shift project

Philippe Picard, le 27 septembre 2021

TIC et énergie

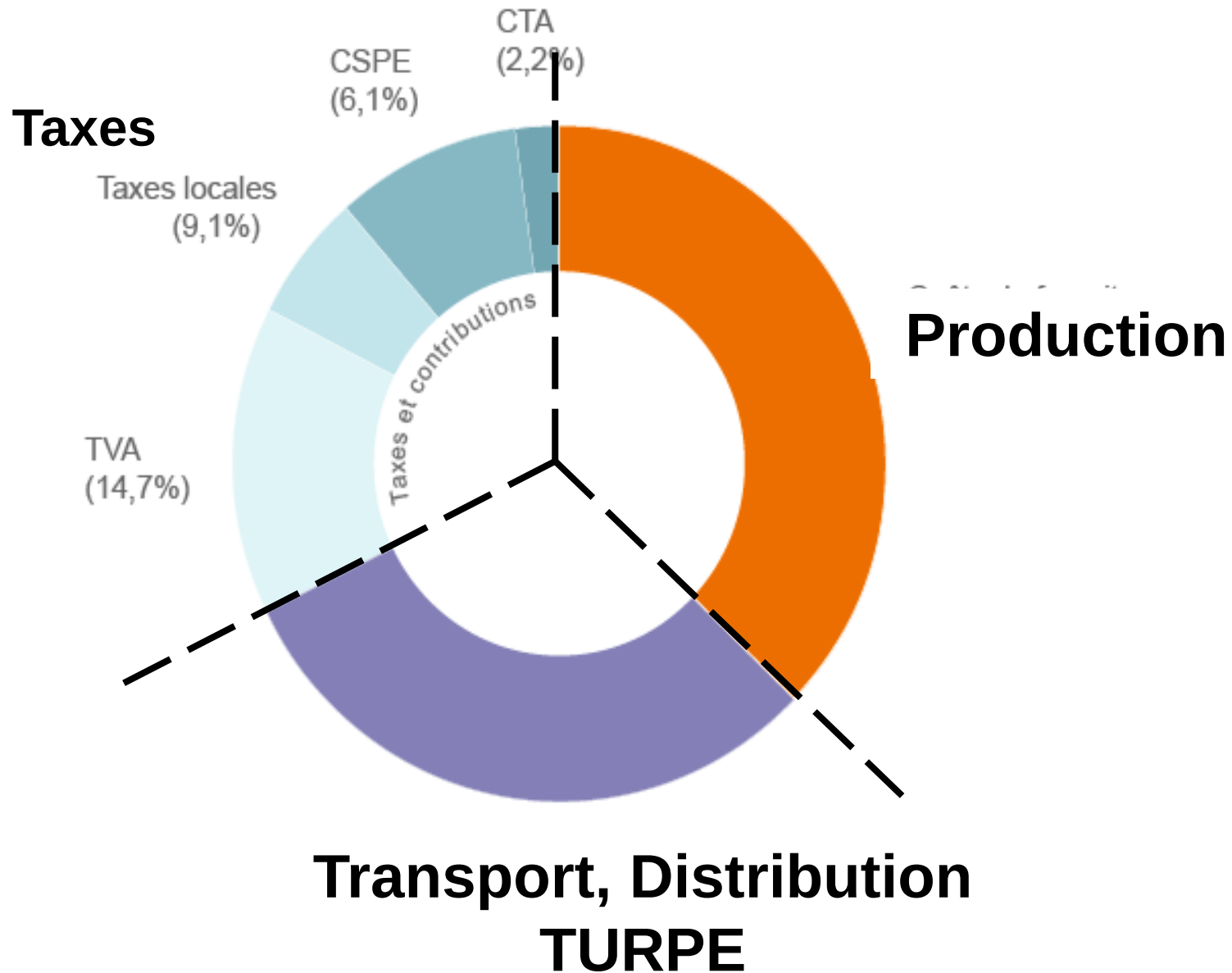
- Intro
- Conso des TIC
- ➔ ■ **Le système électrique**
- Les outils TIC



Quelques termes de gestion électrique

- **Délestage**
- **Effacement (contractuel)**
- **Equilibrage**
- **Energie pilotable / non pilotable**
- **Facteur de charge**
- **Foisonnement**
- **Grid forming**
- **Péréquation tarifaire**
- **Tarification incitative**
- **TURPE**

Composants de la facture d'électricité



Vulnérabilités du système électrique

- Un grand réseau électrique est en **équilibre instable** devant être piloté en permanence
- Risque potentiel de **black-out** régional, national ou continental (« effet dominos »)
- Principales causes potentielles de black-out:
 - Pointe de consommation (cause climatique)
 - Accident réseau haute tension
 - Panne de grande centrale
 - Potentiellement: météo défavorable pour la production par les EnR

Les réseaux électriques sont **synchronisés**

Les réseaux électriques fonctionnent avec du **courant alternatif** :

- Dès l'origine, on a cherché à diminuer les pertes en ligne, avec le transport par **haute tension** (lois d'Ohm et de Joule)
- Le changement de tension doit se faire en alternatif (transfos)

→ Contrainte majeure:

pour s'interconnecter, les réseaux électriques doivent être synchronisés

Contrôle des réseaux: télécom **vs** électricité

Analogies entre réseaux (**télécom**, **EDF**):

- Dimensions et topologies comparables
- Capacité limitée et dimensionnement tenant compte du **foisonnement**

Sécurité

- EDF: tout pour éviter le black-out
- Télécom: principe du « **best effort** » admis

Synchronisation

- Electricité: incontournable
- Télécom: limitation des propagations de congestions (surtout avec l'IP)

Le principe fondamental: équilibrage

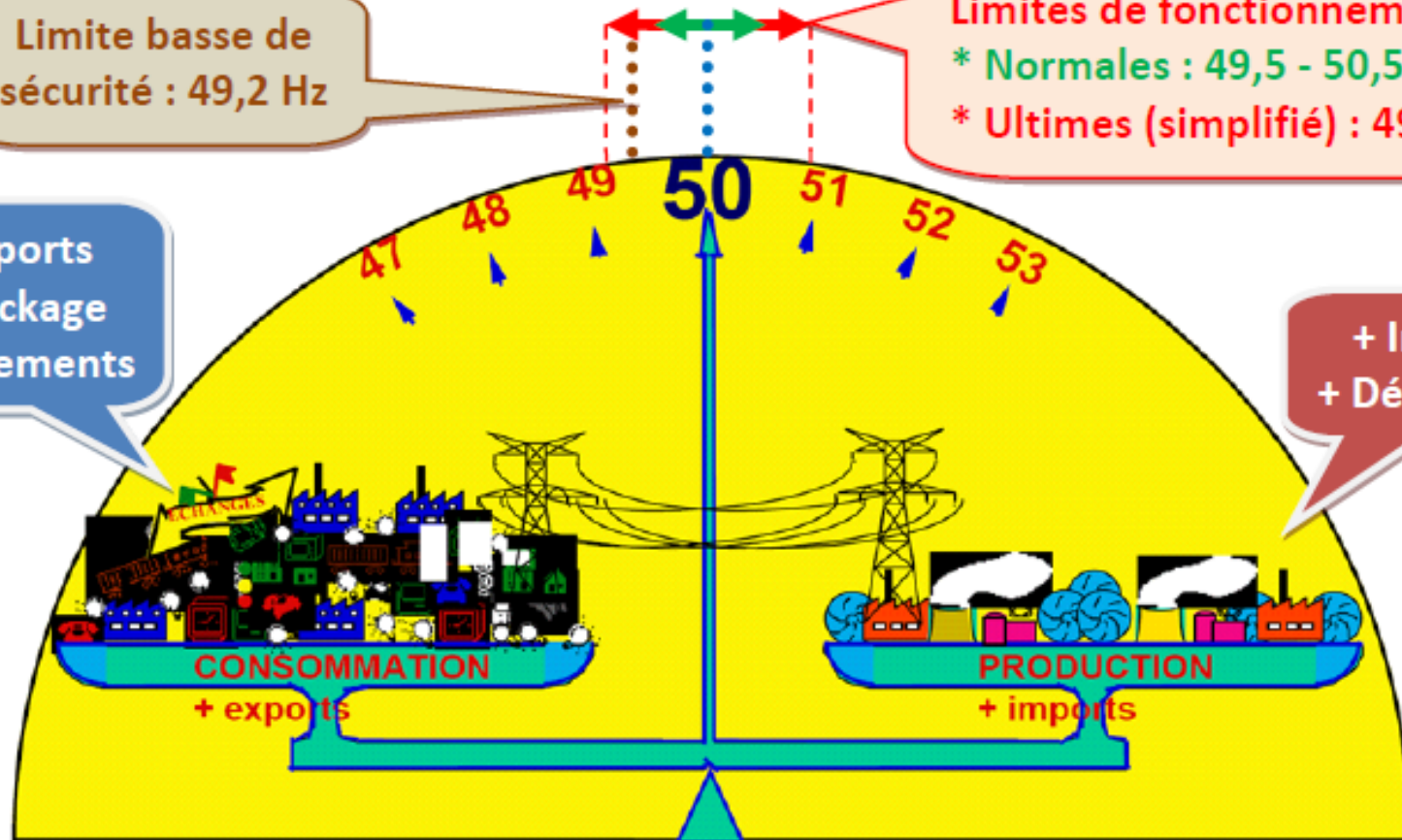
Fréquence = INDICATEUR COMMUN de l'équilibre instantané production-consommation
(La même pour tout ensemble de réseaux interconnectés en courant alternatif)

Limite basse de
sécurité : 49,2 Hz

Limites de fonctionnement :
* Normales : 49,5 - 50,5 Hz
* Ultimes (simplifié) : 49 - 51 Hz

+ Exports
+ Stockage
- Effacements

+ Imports
+ Déstockage



Source RTE

Production = Consommation

Stabilité de fréquence

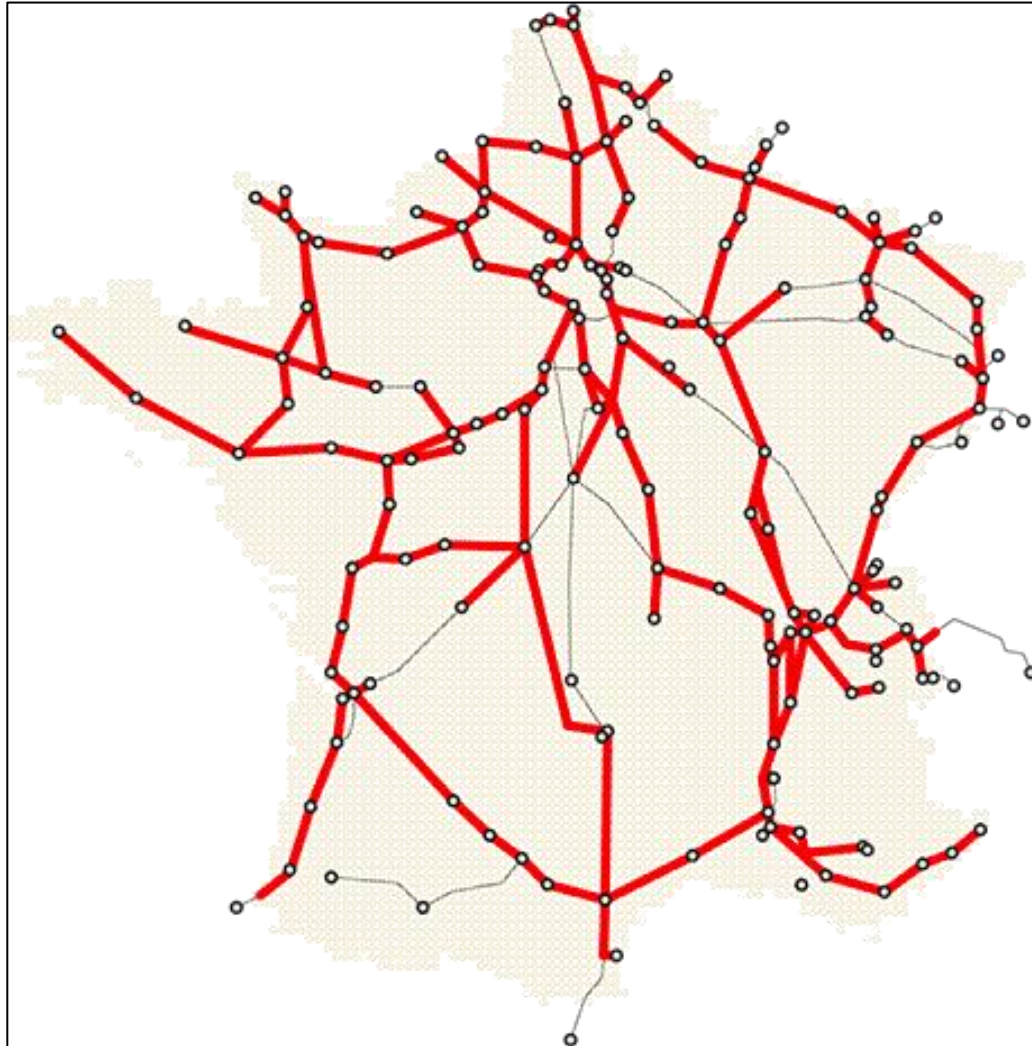
- La stabilité de **fréquence** du système électrique est en priorité assurée par les **volants à inertie** des alternateurs de production classique
- Les sources d'EnR connectées (PV, éolien) n'assurent pas cette stabilité

Rappel: volant d'inertie de fréquence f
 J moment d'inertie, Ω vitesse angulaire = $2\pi f$
Energie cinétique $E = \frac{1}{2} J \Omega^2$
 ΔE proportionnel à Δf

La lutte contre les vulnérabilités

- **Réserves et stockage** (régulation de la fréquence, secours, etc.)
- **Interconnexions** permettant d'élargir la base probabiliste du **foisonnement**:
 - Maillage national du réseau RTE
 - Echanges internationaux
- **Actions sur la consommation par les effacements contractuels ou les délestages**

Réseau de transport RTE



105 000 km de lignes

2710 postes électriques



Interconnexions européennes



Le stockage, élément clé de gestion

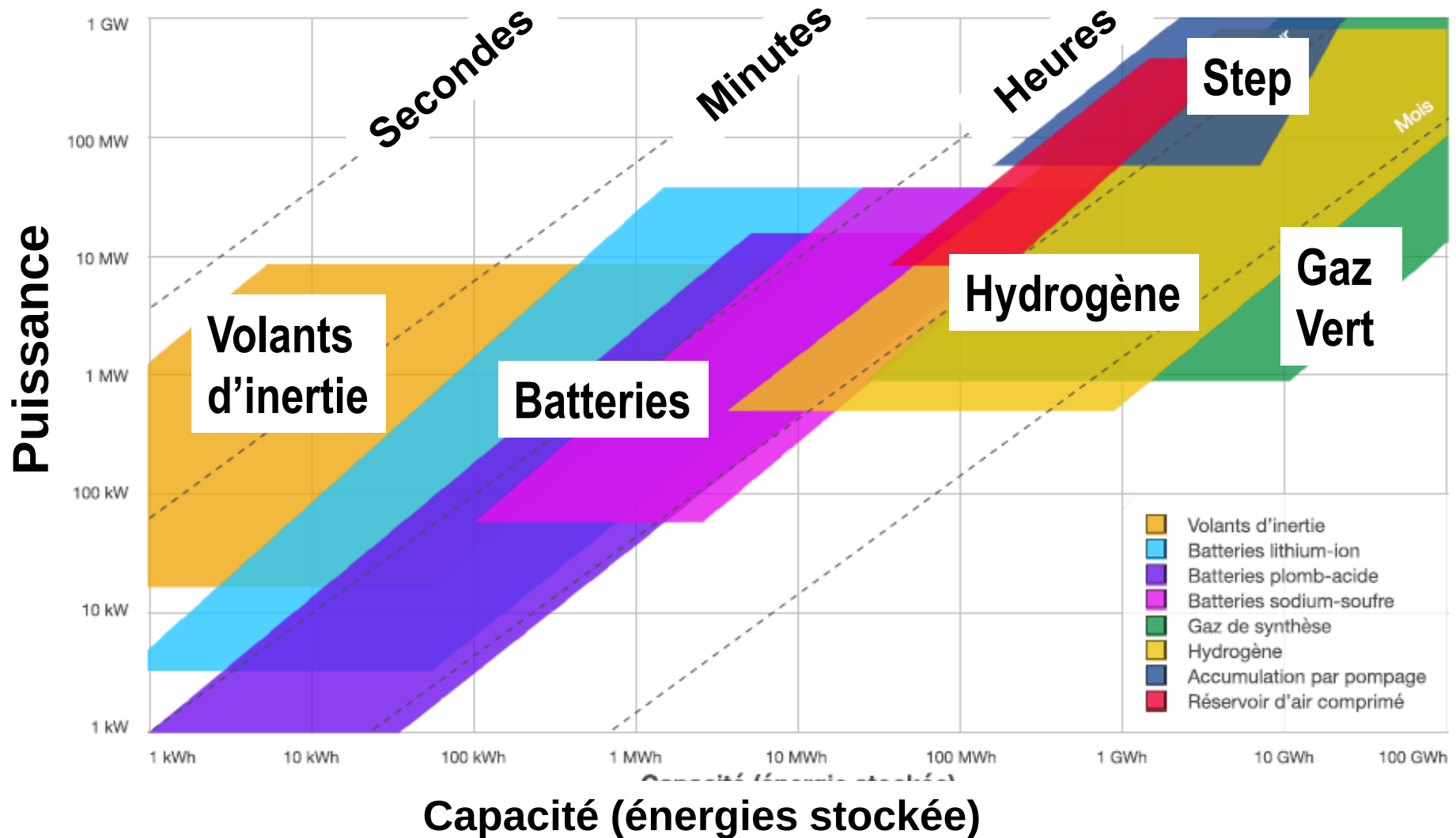
- **Lissage de la production:**
 - **Heures pleines / Heures creuses**
 - **Outil de secours en cas d'incident**
 - **Outil d'exploitation de la surproduction**
- **Outil fondamental d'insertion des EnR intermittentes dans le réseau**

Les trois niveaux de réserve

Nomenclature européenne

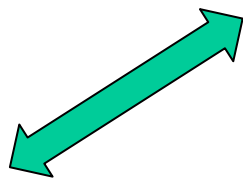
- **R. Primaire:** réagit automatiquement à l'écart de fréquence ($t < 30''$) pour une durée limitée (15')
- **R. Secondaire:** activation automatique par signal centralisé ($t < 6'$)
- **R. Tertiaire:** activation centralisée manuelle (à partir de 15')

Stockage: capacité, puissance, réactivité



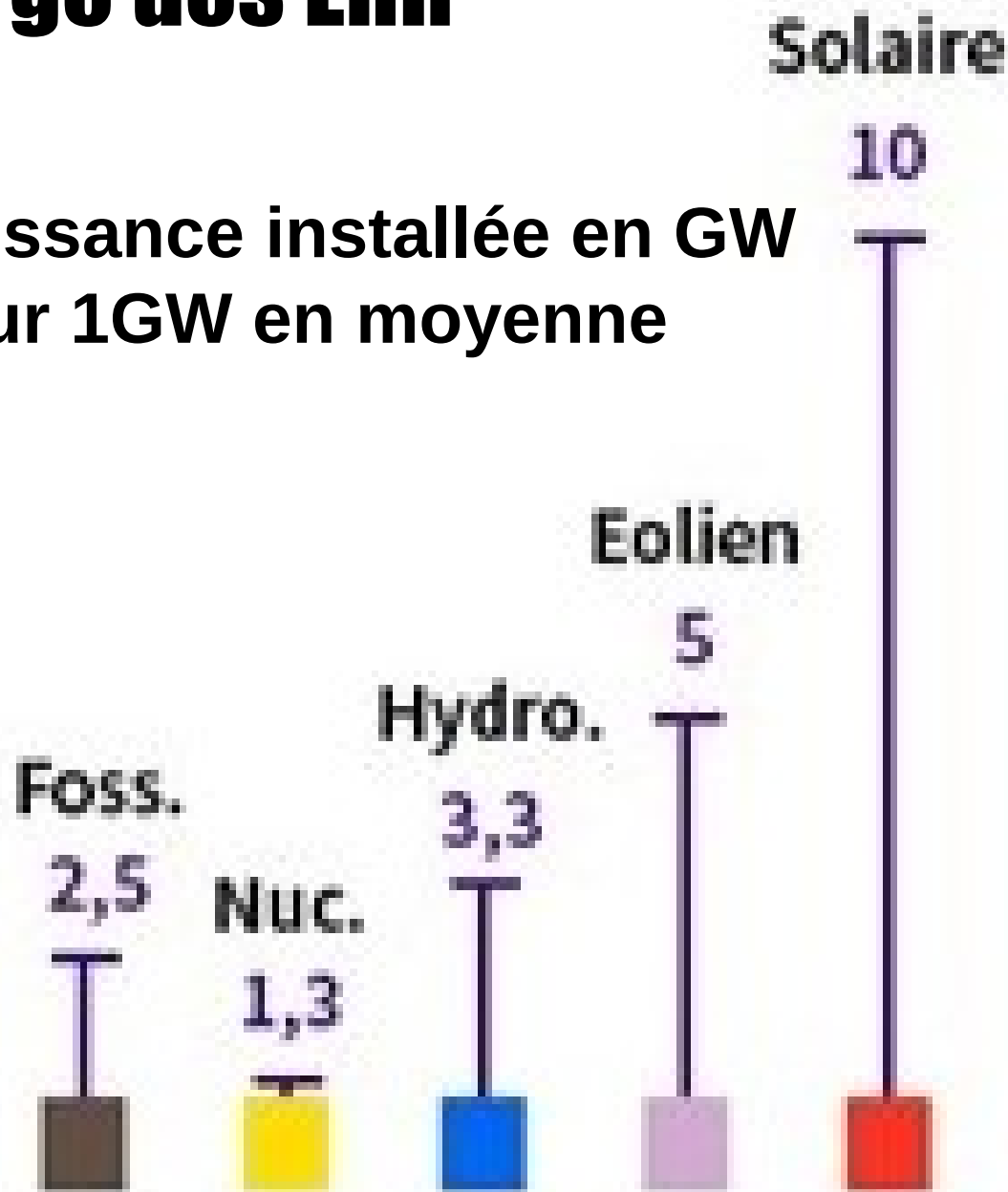
Facteur de Charge des EnR

Puissance installée en GW
pour 1GW en moyenne



FACTEUR DE CHARGE

FOSSILE	40%
NUCLEAIRE	77%
HYDRAULIQUE	30%
EOLIEN	20%
SOLAIRE	10%



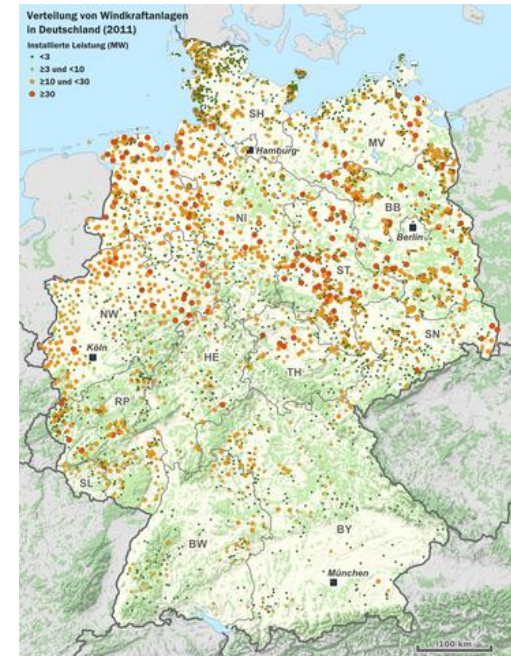
Usages des EnR: quelle stratégie ?

- **Réseaux isolés** (îles p.ex. Ile de Sein, 100% EnR en 2030):
 - Stockage important (batteries)
 - Secours par groupes électrogènes
 - Pilotage par « **Energy Management System** »
- **Réseaux connectés**, de nombreux problèmes à résoudre :
 - Quelle chaîne de liaison entre microgrid et réseau?
 - Tarifs d'interconnexion (import et export)
 - Pilotage (réseaux **"intelligents"**)

Usages des EnR: quelle stratégie ?

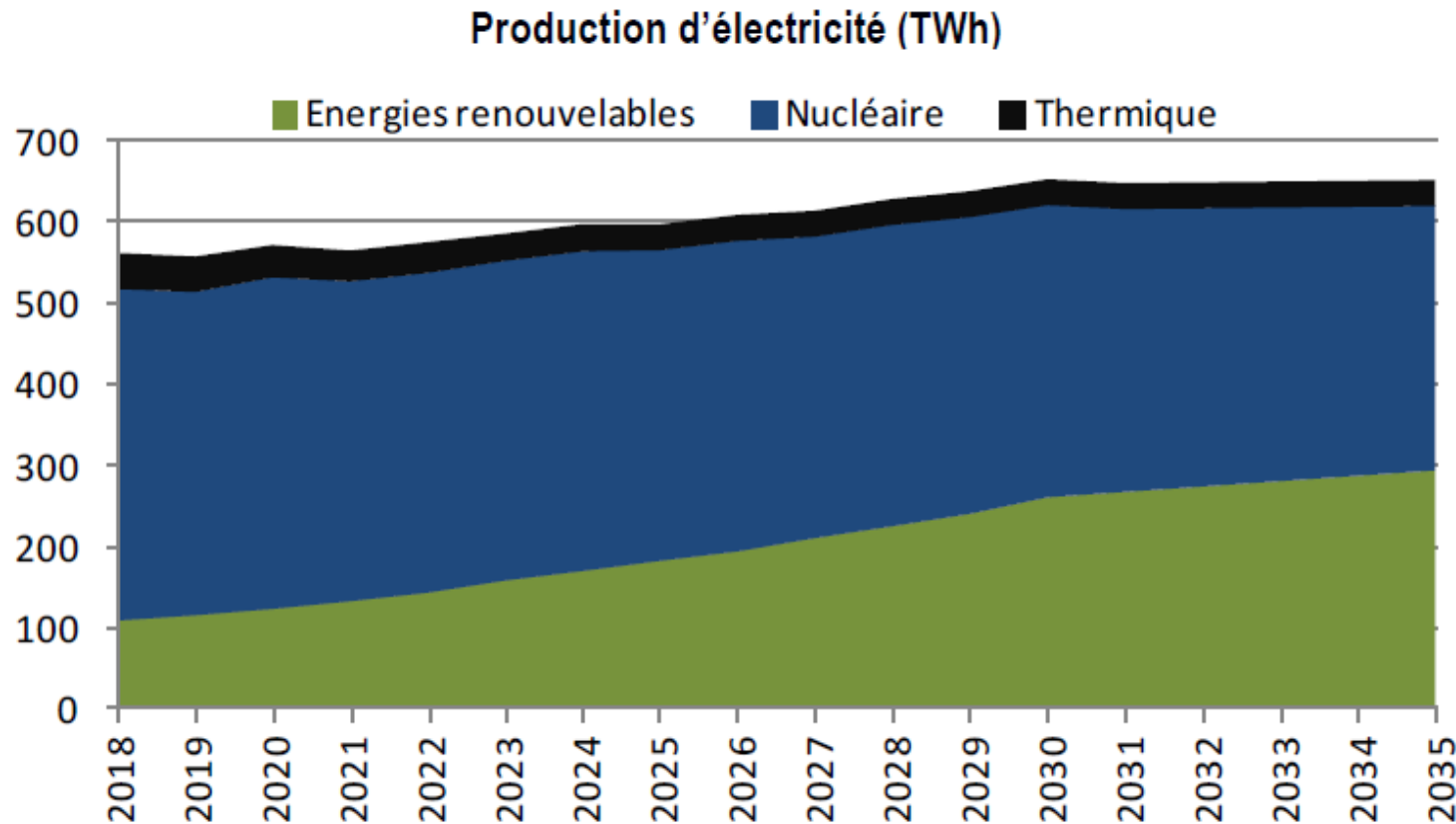
Exemple de l'Allemagne:

- Le vent est au **nord**
- Les besoins sont au **sud**
- Les lignes à haute tension nuisent au paysage !!!



La généralisation des EnR implique des investissements massifs de stockage et de transport

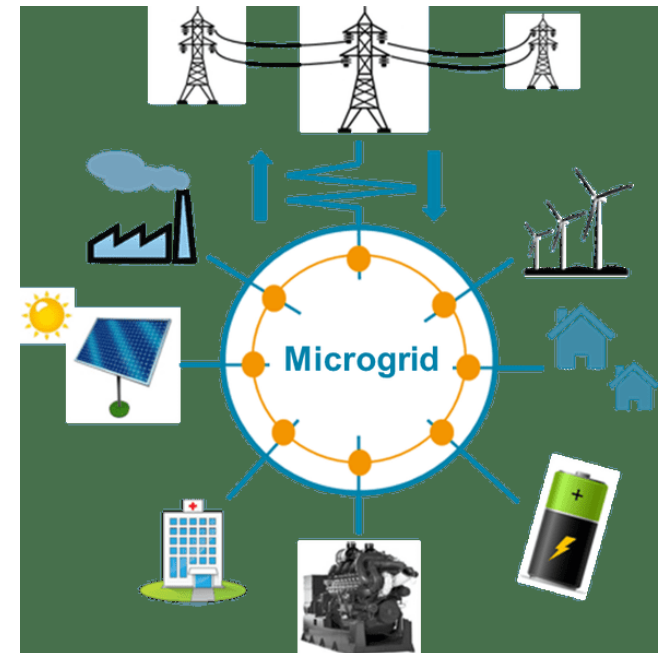
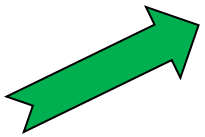
Evolution du mix électricité (selon le PPE) ?



2050 ?

TIC et énergie

- Intro
- Conso des TIC
- Le système électrique
- **Les outils TIC**



Les télécommunications au cœur du système électrique français 1946-2000

Alexandre Giandou • Claude Leclère
Jacques Lecouturier • Jean-Marc Spetebroodt
Henri Thibert • André Vilatte



Télécom et système électrique : une longue histoire

EDF, très grand utilisateur de calcul

- EDF précurseur du **HPC** (High Performance Computing)

- Principaux domaines:

- Nucléaire
- Pilotage équilibre
- Sécurité

- Techno

- Massivement parallèle
- IA



Pilotage du système électrique

■ Outils statiques

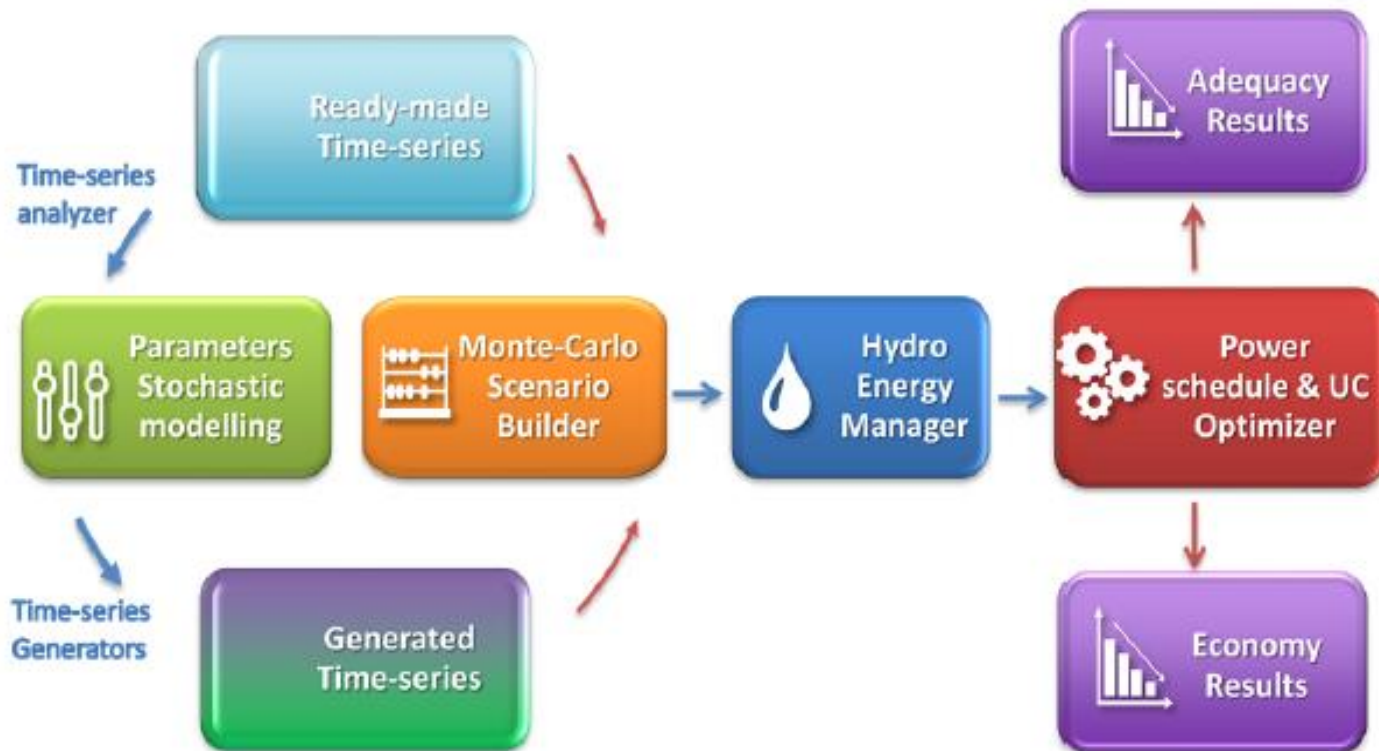
- Planification et simulations
- Tarifs modulés
- Réglementation: TURPE, ARENH (Accès Régulé à l'Electricité Nucléaire Historique)

■ Outils dynamiques

- Nucléaire
- Stockage
- Effacement et délestage
- Interconnexions internationales
- Réseaux « intelligents »

Outil de simulation: **Antares**

Logiciel pour tester des combinaisons d'aléas météorologiques et techniques et observer leurs impacts sur l'équilibre entre production et consommation d'électricité. Permet des études économiques et prospectives à RTE et en Europe.



Pilotage dynamique

- **Gestion des Incidents (réseau de transport, centrales)**
- **Optimisation du stockage et de la gestion des réserves**
- **Anticipation météo sur la demande et les EnR**
- **Marchés spot internationaux**

Pilotage du système



Supervision centrale



Centres de pilotage



Les nouveaux défis du SI électrique

Complexité accrue du pilotage et de l'équilibrage

■ Insertion des EnR

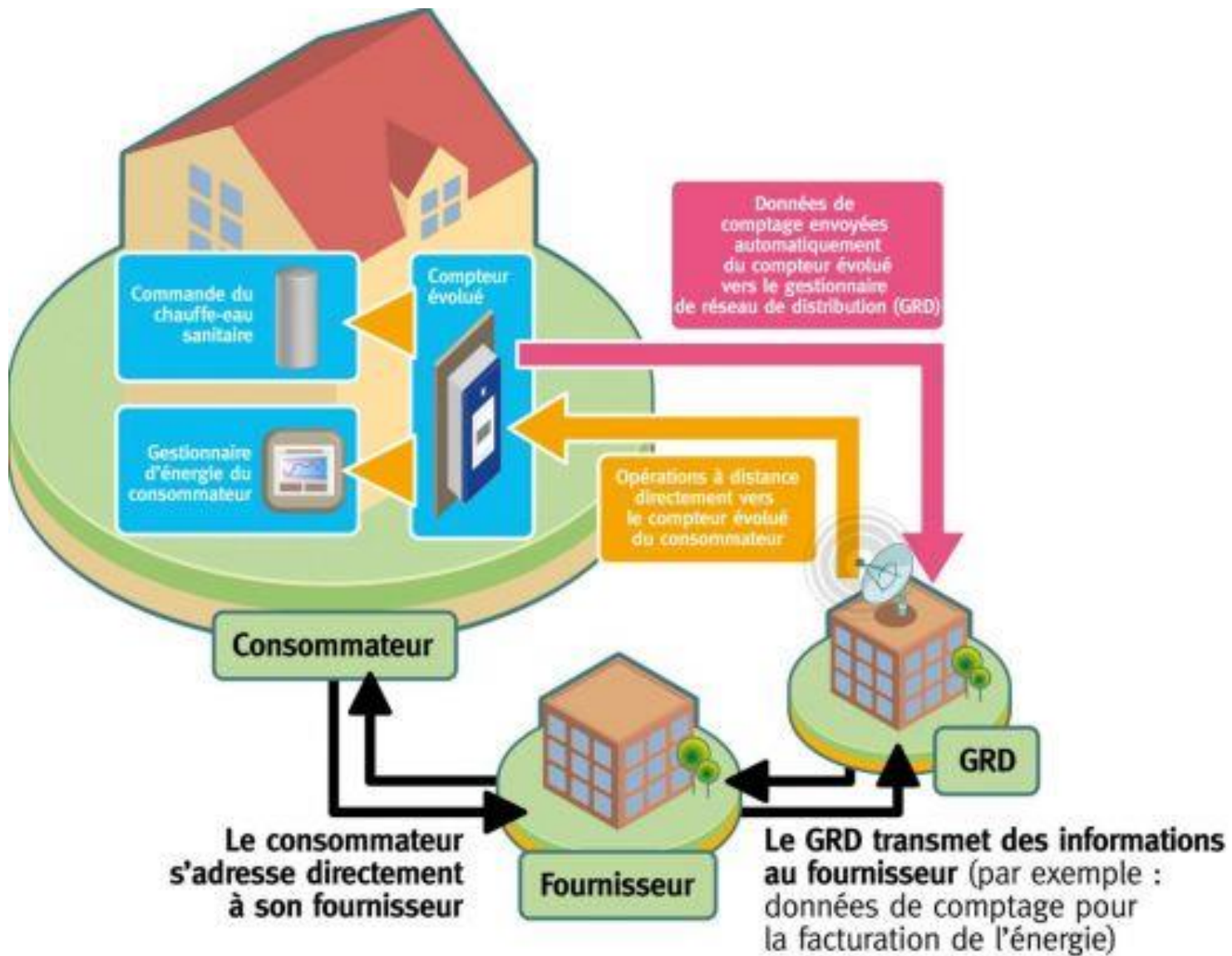
- Intermittence: optimisation des réserves
- Interconnexion de réseaux micro grids

■ Les clients sont « **consom**acteurs »

■ Gestion de l'**effacement diffus**, poids des véhicules électriques

■ Tarification en « temps réel »

EnR et réseau: les **consom**acteurs



Les nouveaux outils du SI

■ IA et big data

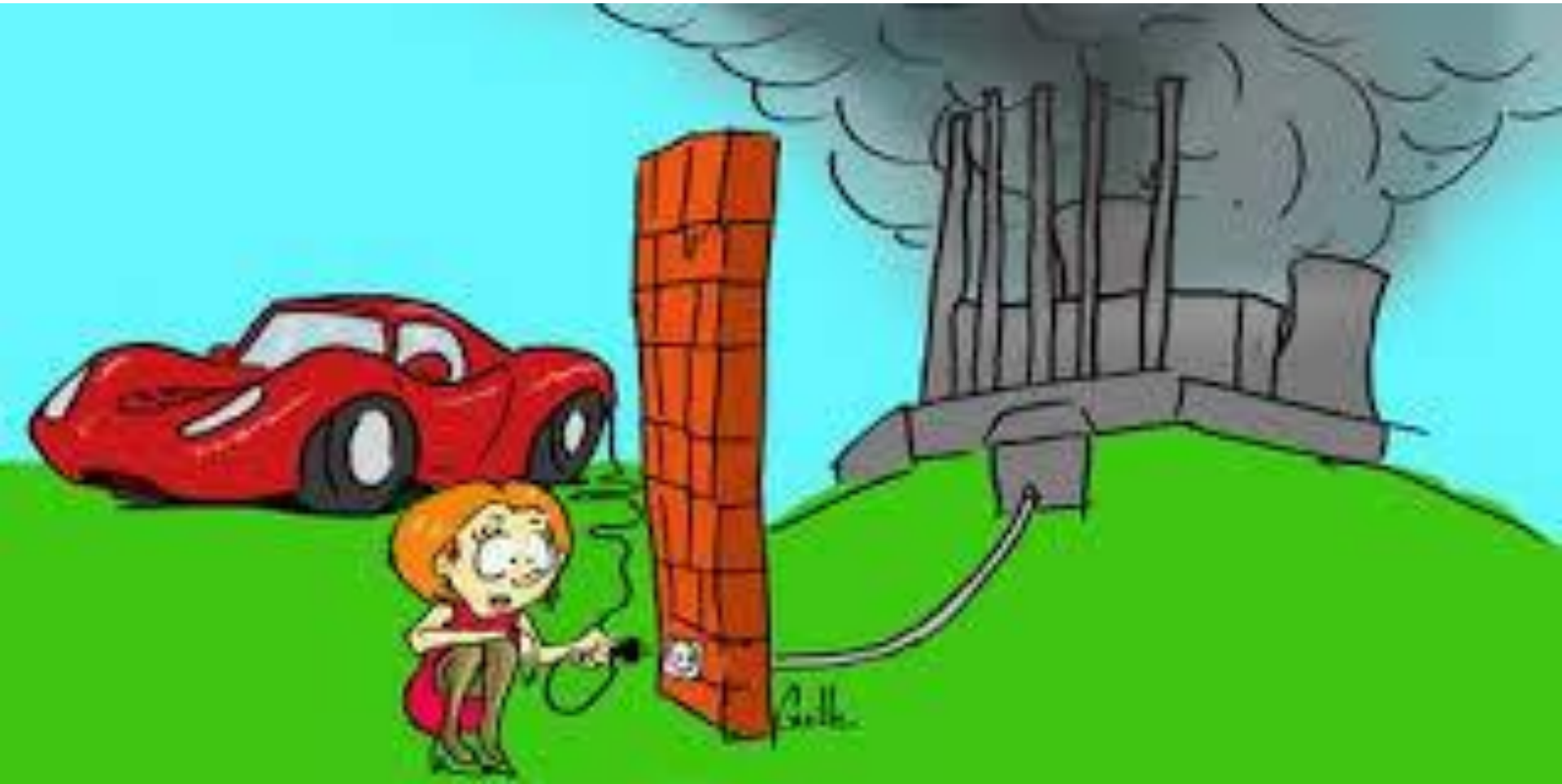
- Simulation et « jumeaux numériques »
- À l'intérieur des microgrids
- Entre microgrids et réseau national
- Entre réseaux internationaux

■ Blockchains pour l'interconnexion des réseaux et leurs échanges financiers

SECURITE, CYBERSECURITE

Quelques conclusions

Approche globale indispensable



Critères d'évaluation des transitions

- Coût actualisé total:
 - Dans le temps: cycle de vie complet y compris les déchets (par exemple nucléaire ou recyclage des batteries)
 - Dans l'espace avec les coûts du transport et d'intégration dans le système global
- Bilan carbone total du cycle
- Impact sur l'emploi
- Constante de temps de chaque transition et investissements nécessaires

Prospective économique

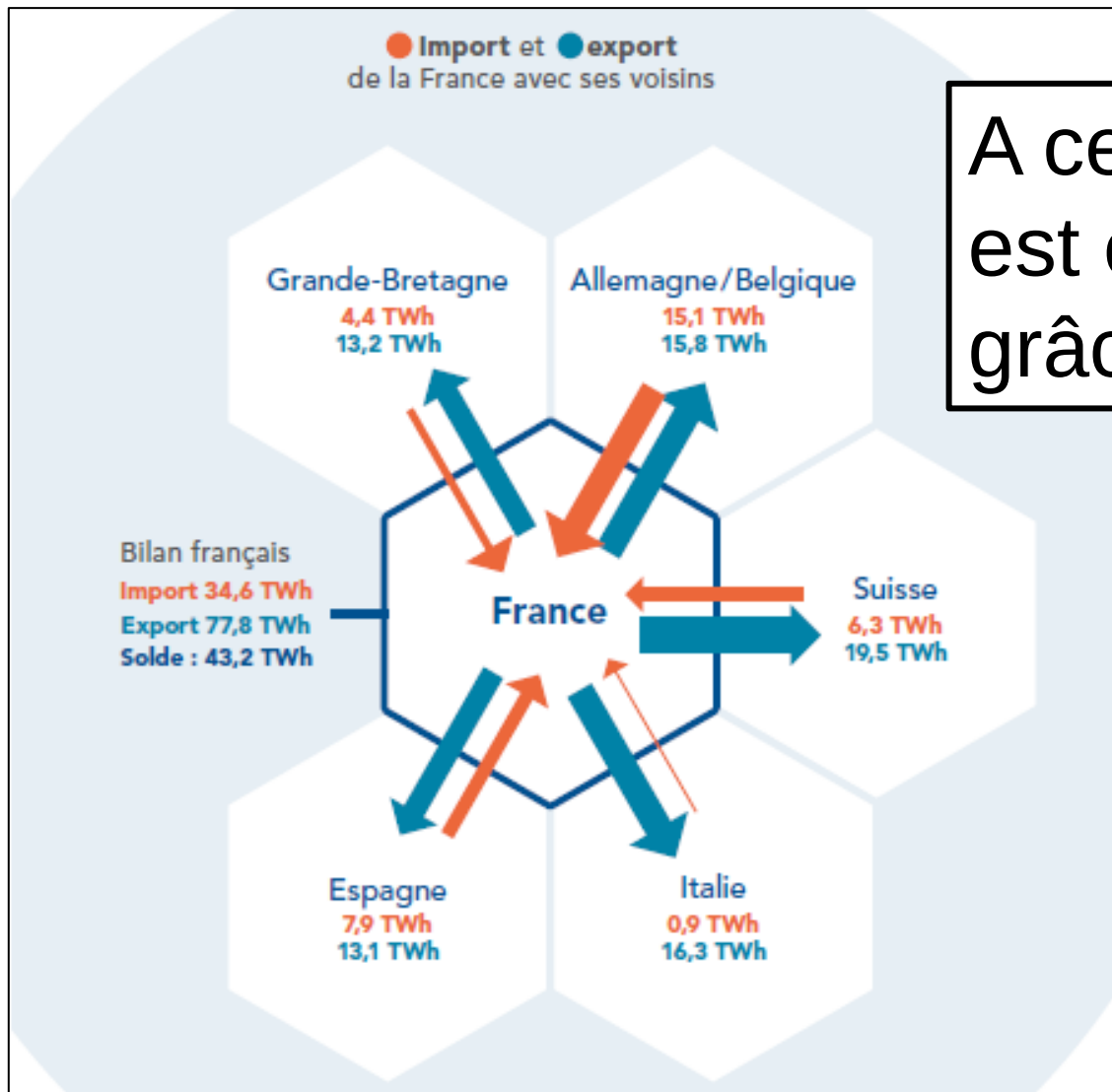
- La « Stratégie nationale bas carbone » (SNBC) aura certainement un coût important
- « La décarbonation peut être considérée comme un choc d'offre négatif, à l'instar des chocs pétroliers des années 1970. A court terme, au moins, elle aura forcément un effet négatif sur la production potentielle »
- La croissance actuellement exponentielle de l'énergie de l'IT trouvera rapidement ses limites naturelles

Rêve écolo



Réserve

Echanges européens



A ce jour, la France est excédentaire grâce au nucléaire

Rendements

Le véhicule électrique à batteries est 6 à 7 fois plus économe en énergie électrique que celui à hydrogène



Avec les mêmes 100 kWh d'énergie au départ le VE à batteries parcourra 500 km* contre 75 km* pour celui à hydrogène !

* Autonomie évaluée pour une consommation moyenne de 16 kWh / 100 km

Smart Grids: système hyper complexe

SMART GRID

Une vision du futur : Un réseau de micro-grilles intégrées qui peuvent se réguler et se réparer elles-mêmes.

Applications intelligentes pouvant se fermer en fonction des fluctuations de fréquences

Gestion de la demande : Les utilisations peuvent être déplacées en heures creuses pour réaliser des économies

