



# 1. Quels matériaux pour quels systèmes : vers un monde plus électrique

**Nicolas PERRY et Stéphane CLENET**

[nicolas.perry@ensam.eu](mailto:nicolas.perry@ensam.eu) [stephane.clenet@ensam.eu](mailto:stephane.clenet@ensam.eu)

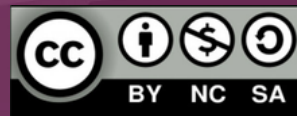


**ARTS  
ET MÉTIERS**

14/03/2024

**ECO  
CONCEVOIR  
DEMAIN**

CC BY-NC-SA



# Economie Circulaire et transition environnementale

---

## Sommes nous en capacité d'assurer les transitions nécessaires ?

### 3 WEBINAIRES

14/03 : 1. **Quels matériaux pour quels systèmes : vers un monde plus électrique**  
S.Clenet – N.Perry Moteur électrique

11/04 : 2. Les Flux de Matières, criticité des ressources et économie circulaire  
T.Bauer – N.Perry Batterie électrique

16/05 : 3. Matériaux pour la transition et évaluation en ACV(s)  
C.Charbuillet – T.Reyes Véhicule électrique

### Sommaire

- Transitions : plus une option
- Quels matériaux / ressources pour la transition électrique
- Adéquation besoin / ressources : Recyclage et matériaux critiques / stratégiques
- Et la recherche : Projet EU Maxima

### SOMMAIRE

# Cadre de référence



17 OBJECTIFS DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

17 ODD - 17 SDG'S

NATIONS UNIES  
2015



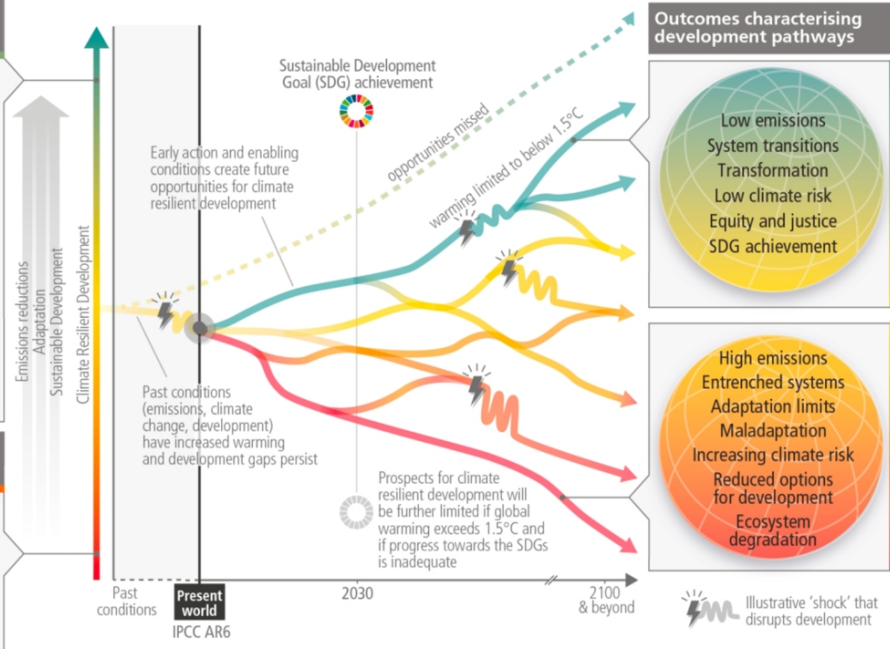
# NÉCESSITÉ DES TRANSITIONS

## Scénarios d'évolutions / résilience

### 6ème rapport d'évaluation du GIEC 2022

#### Multiple interacting choices and actions can shift development pathways towards sustainability

- Conditions that enable individual and collective actions**
- Inclusive governance
  - Diverse knowledges and values
  - Finance and innovation
  - Integration across sectors and time scales
  - Ecosystem stewardship
  - Synergies between climate and development actions
  - Behavioural change supported by policy, infrastructure and socio-cultural factors
- Conditions that constrain individual and collective actions**
- Poverty, inequity and injustice
  - Economic, institutional, social and capacity barriers
  - Siloed responses
  - Lack of finance, and barriers to finance and technology
  - Tradeoffs with SDGs

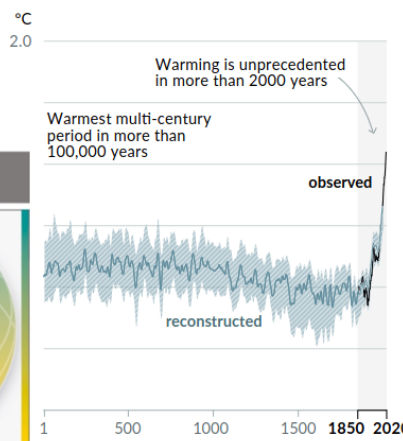


- Outcomes characterising development pathways**
- Low emissions
  - System transitions
  - Transformation
  - Low climate risk
  - Equity and justice
  - SDG achievement

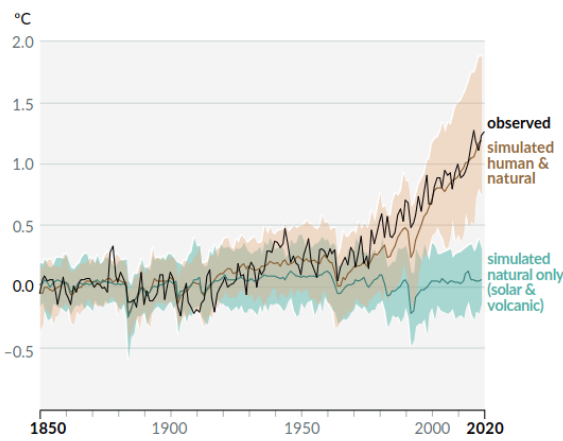
- High emissions
- Entrenched systems
- Adaptation limits
- Maladaptation
- Increasing climate risk
- Reduced options for development
- Ecosystem degradation

#### Changes in global surface temperature relative to 1850–1900

(a) Change in global surface temperature (decadal average) as reconstructed (1–2000) and observed (1850–2020)



(b) Change in global surface temperature (annual average) as observed and simulated using human & natural and only natural factors (both 1850–2020)



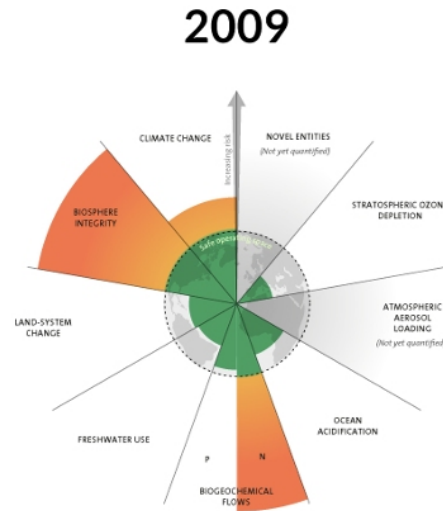
Températures extrêmes  
 Modification du cycle de l'eau  
 => précipitations intenses  
 => sécheresses et rendement agricoles

# Limites planétaires - Stockholm Resilience Centre

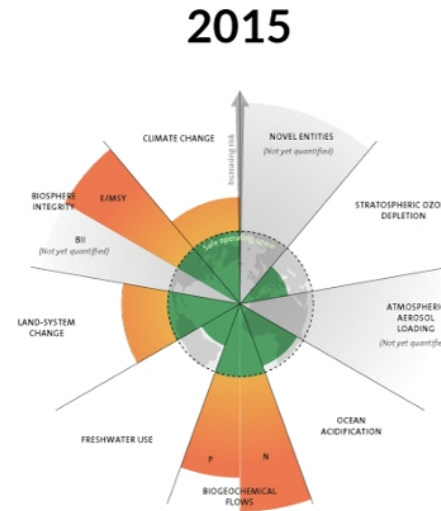
Changement climatique  
Perte de biodiversité  
Acidification des océans  
Utilisation d'eau douce  
Rejet de nouveaux produits chimiques

Appauvrissement de la couche d'ozone  
Pollution atmosphérique par les aérosols  
Changement d'utilisation des sols  
Flux biogéochimiques d'azote et de phosphore

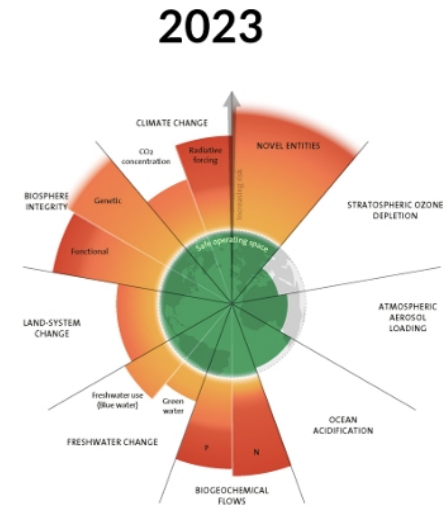
NÉCESSITÉ  
DES  
TRANSITIONS



3 limites dépassées



4 limites dépassées

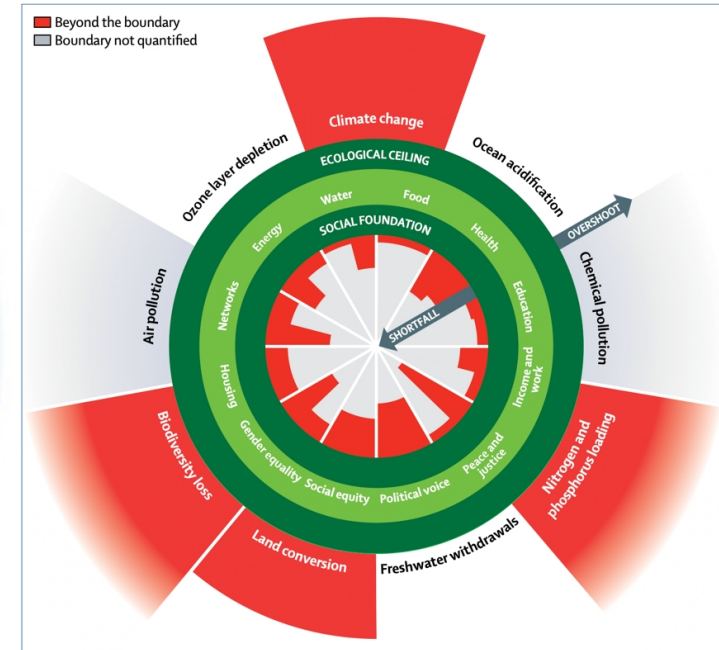
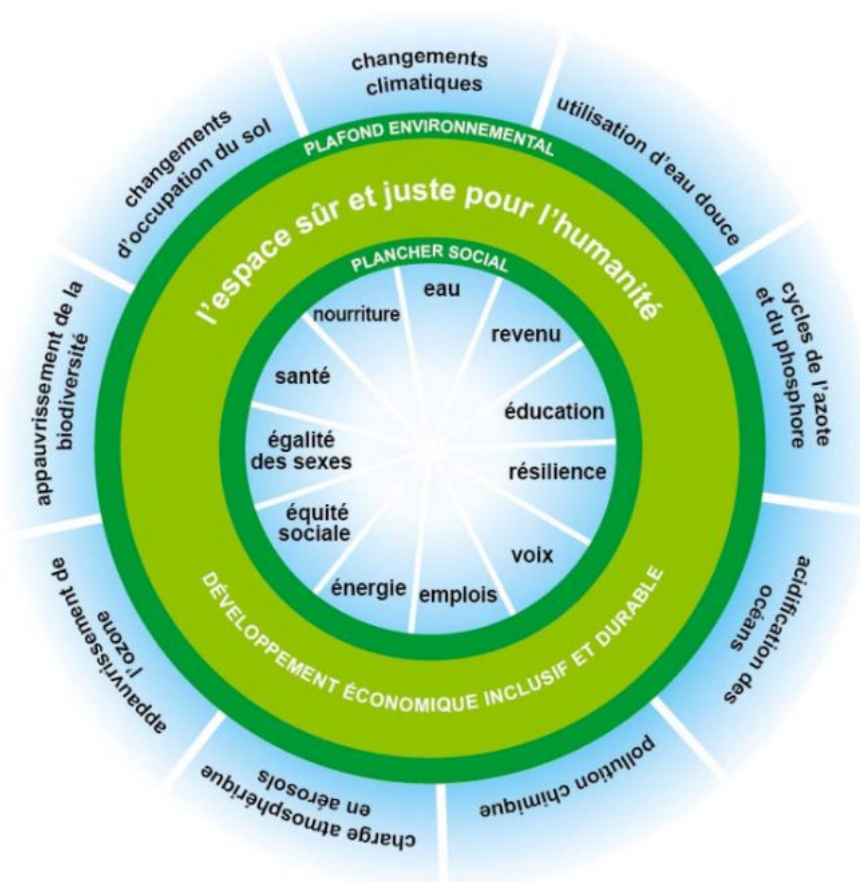


6 limites dépassées

ROCKSTRÖM, Johan, STEFFEN, Will, NOONE, Kevin, et al. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. Ecology and society, 2009, vol. 14, no 2.

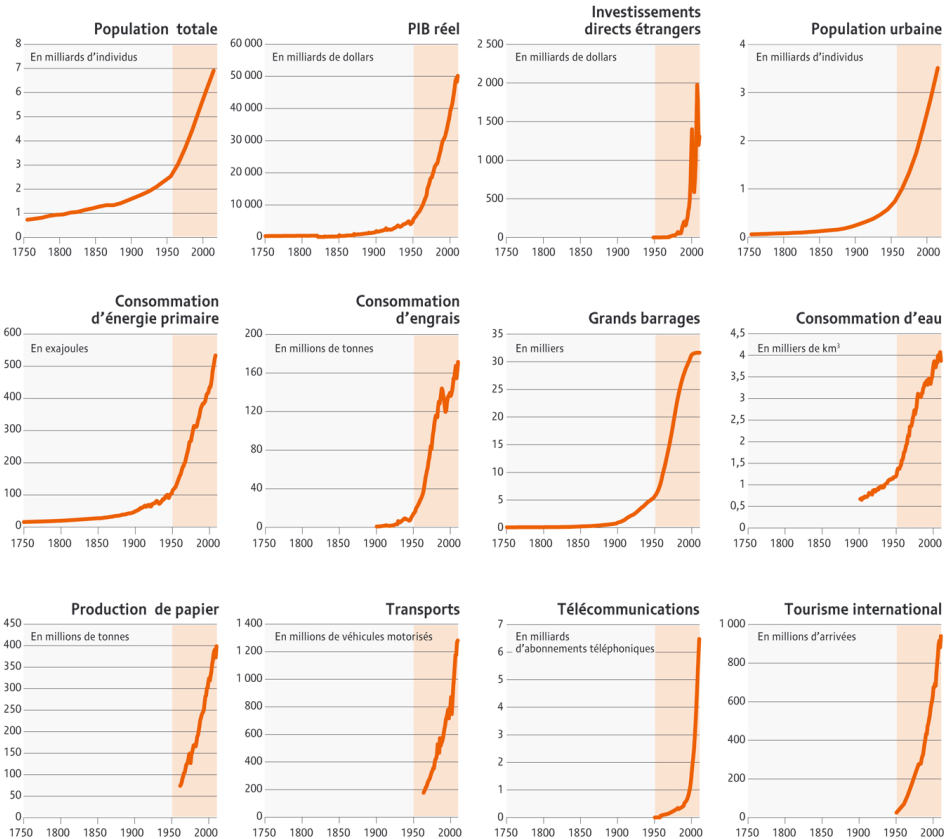
# Théorie du Donut - Raworth

NÉCESSITÉ  
DES  
TRANSITIONS

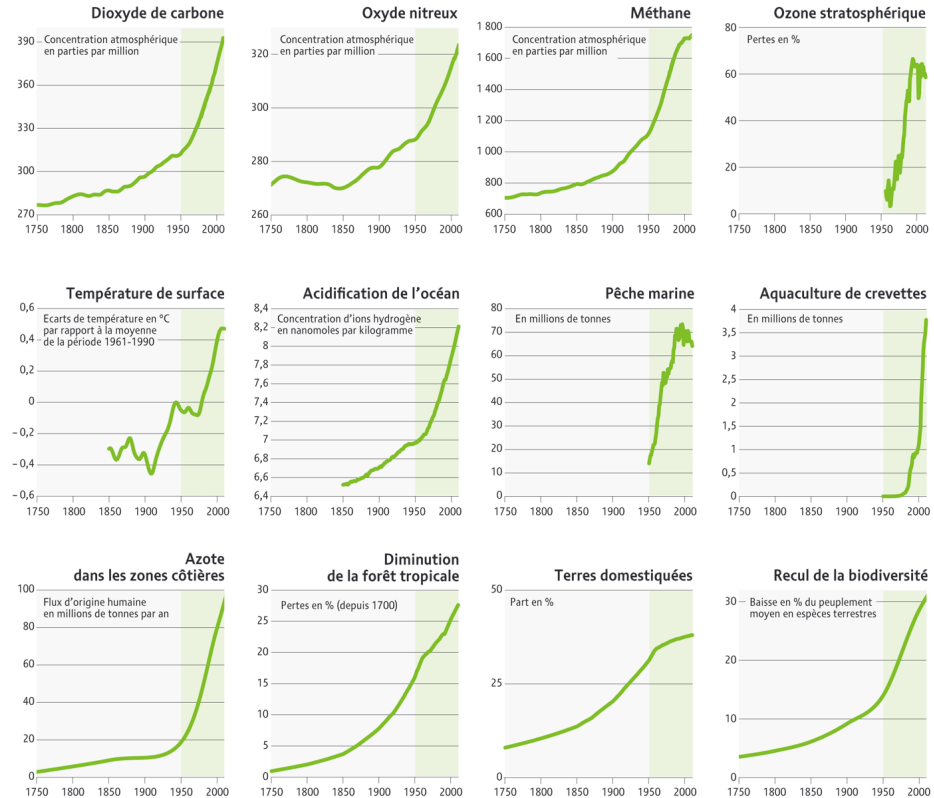


# Graphes de la Grande Accélération

## Développement socio-économique



## Evolution du système Terre



Source : Will Steffen, Wendy Broadgate, Lisa Deutsch, Owen Gaffney et Cornelia Ludwig, « The trajectory of the Anthropocene : the Great Acceleration », *The Anthropocene Review*, 2015 (données : International Geosphere-Biosphere Programme et Stockholm Resilience Centre).

NÉCESS  
DES  
TRANS

Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O., & Ludwig, C. (2015). The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review*, 2(1), 81-98

# Transition environnementale = transitions énergétiques

---

## Besoins des transitions environnementales

- Décarboner : réduire les émissions de GES (gaz à effet de serre)
- S'adapter aux conséquences dérèglement climatique
- Préserver / restaurer la biodiversité
- Gérer / régénérer durablement les ressources naturelles (eau, minerais, faune et flore)

## Comment

- Sobriété, Circularité, Lowtech
- Innovations technologiques : ENR, Technologies vertes (à démontrer), ...
- Sensibiliser et impliquer la société : décideurs et citoyens

NÉCESSITÉ  
DES  
TRANSITIONS

## Les besoins des transitions environnementales

NÉCESSITÉ  
DES  
TRANSITIONS

### Plus de besoins électriques

- Produire de l'électricité
- Stocker / transporter
- Utiliser

**=> ÉNERGIE = MATÉRIAUX**

### Les systèmes

- Moteurs
- Batteries
- Panneaux photovoltaïques
- Éolienne

*Material Footprint : 14 t/hab en 2021 (EU 14.8)*

matières premières mobilisées pour satisfaire la consommation finale d'un pays, y compris les flux indirects

# Pourquoi une transition énergétique vers l'électrique ?

---

## TRANSITION VERS L'ELECTRIQUE

Electricité :

Produire (*possible*)

Transporter

Utiliser (conversion sous forme thermique, mécanique, chimique...)

- sans émission de gaz à effet de serre

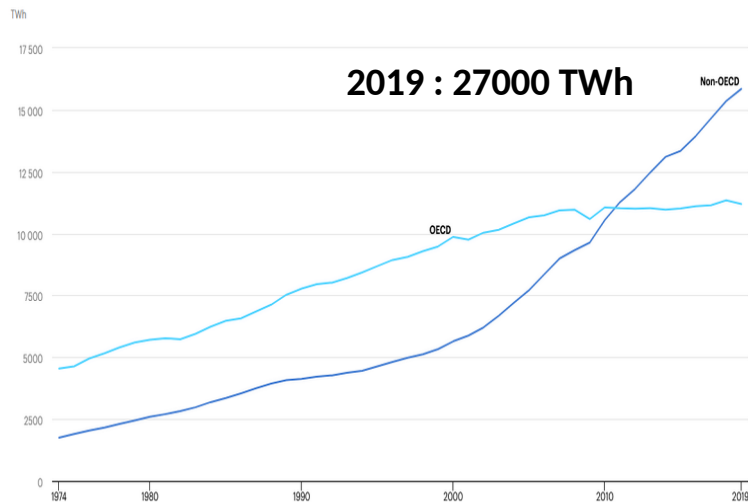
- avec un très bon rendement

- avec un contrôle/gestion précis et rapide

# Impact sur la production de l'électricité

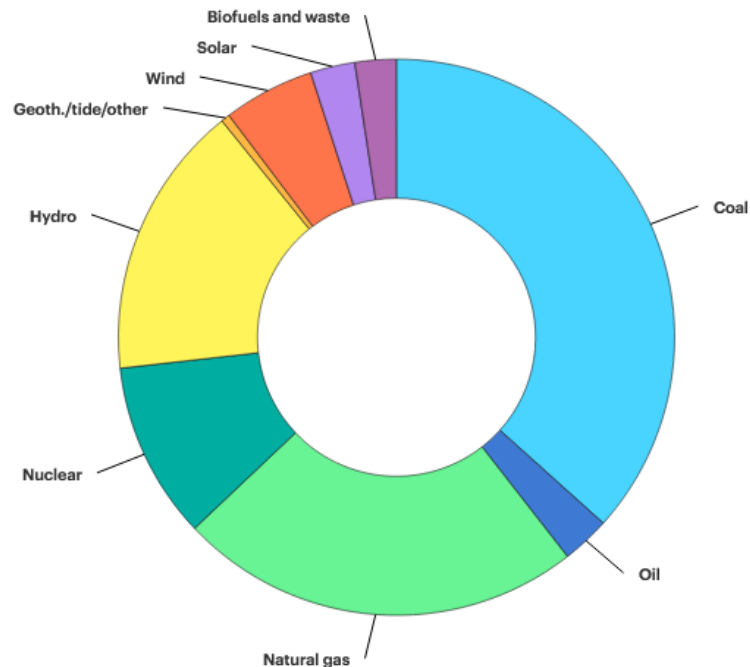
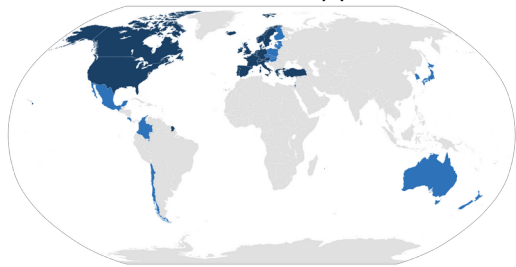
TRANSITION  
VERS  
L'ELECTRIQUE

## Evolution de la production d'énergie dans le monde



## Evolution de la production d'énergie électrique dans les pays de l'OCDE et hors OCDE

Source IEA : <https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview/electricity-production>



## Part des différentes sources d'énergie dans la production mondiale d'électricité en 2019

Source IEA : <https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview/electricity-production>

# Impact sur la production de l'électricité

Production d'énergie électrique renouvelable

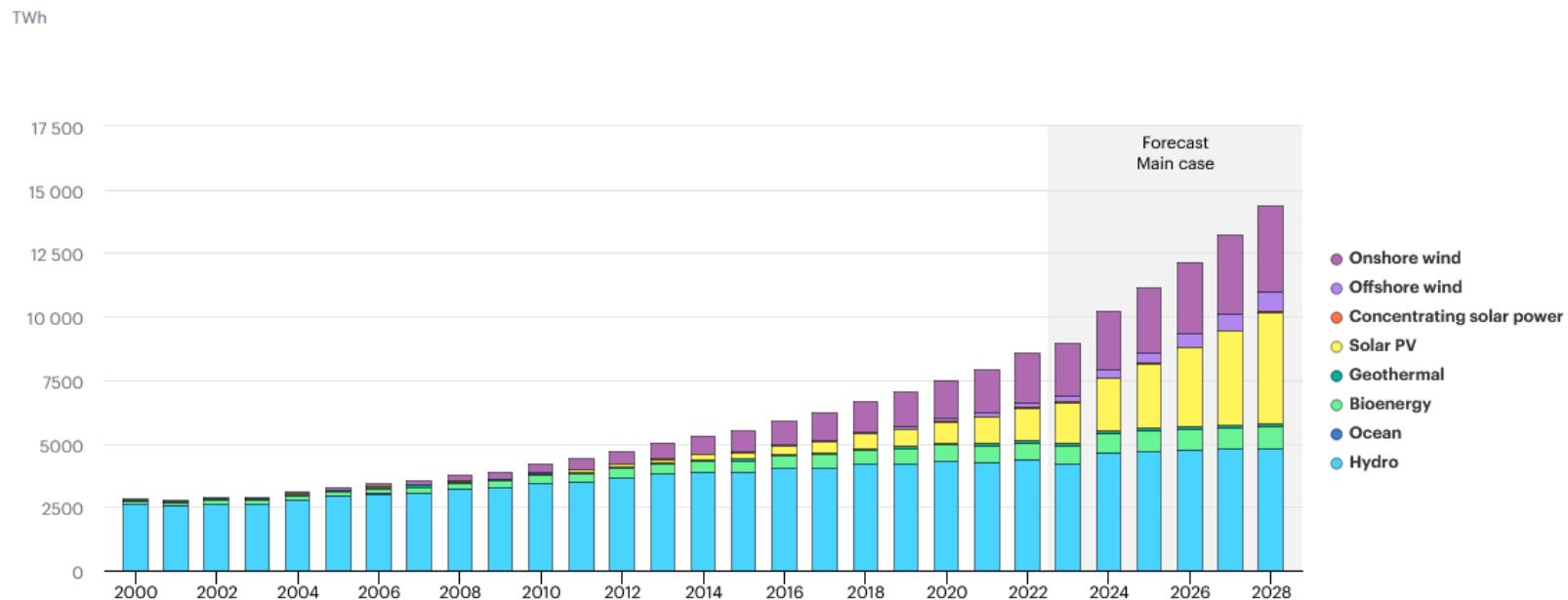
Hydraulique

Eolien

Photovoltaïque

Bioénergie

TRANSITION  
VERS  
L'ELECTRIQUE



Evolution de la production d'électricité par énergie renouvelable dans le monde  
Source IEA : <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/renewable-energy-progress-tracker>

## Impact sur le transport de l'électricité

Les **gestionnaires des réseaux de transport de l'énergie électrique** doivent faire face au **renouvellement des lignes existantes et en même temps au renforcement du réseau** pour répondre :

- A l'augmentation du besoin en électricité (de 430TWh en 2020 à 630TWh en 2050)
- A la diversification des sources de production (notamment avec les énergies renouvelables)
- A la sécurisation du réseau Européen et aux transferts internationaux

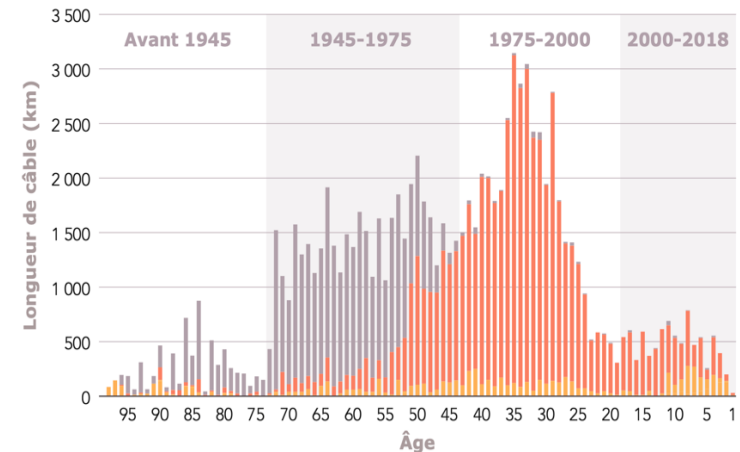
**Avant 1945** : Premier développement des réseaux électriques afin d'évacuer les productions hydrauliques et desservir les régions. La technologie de câbles utilisés est composée d'aluminium et d'acier.

**1945-1975** : Développement d'un premier niveau de réseau de grand transport (en 225 kV) pour interconnecter les régions avec une utilisation massive des câbles en Aluminium - Acier.

**1975-2000** : Développement d'un nouveau niveau de tension 400 kV en lien avec l'émergence du parc électro-nucléaire et apparition d'une nouvelle technologie de câble en Almélec offrant un meilleur compromis technico-économique.

**2000-2018** : Développement plus modéré du réseau électrique en aérien *via* le recours plus fréquent au souterrain et apparition de nouvelles technologies de câble dit « à faible dilatation » offrant des meilleures capacités de transit.

■ Almélec ■ Aluminium - Acier ■ Autres



Pyramide des âges des conducteurs aériens

Source RTE : <https://bilan-electrique-2020.rte-france.com/reseau-de-transport-renouvellement/#>

A ce jour, l'âge moyen des lignes installées en France est de 40 ans. La limite d'âge est fixée à 85 ans. Le volume de câbles à remplacer passe de:

-**6500 km** de 2020 à 2030

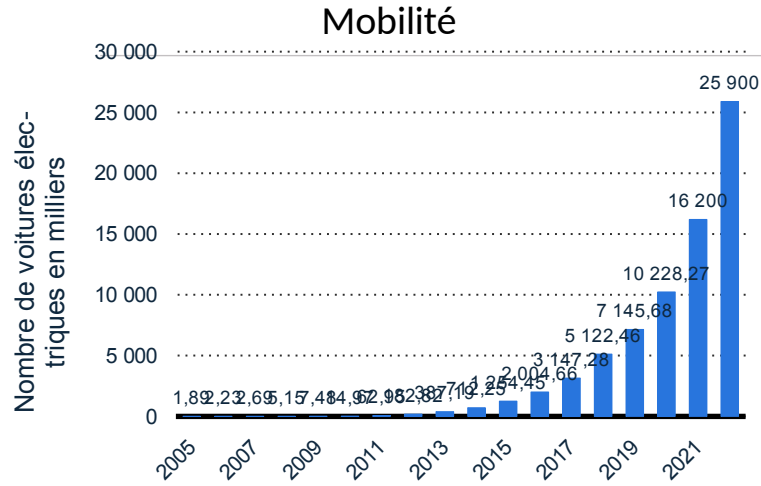
-à **9500 km** de 2030 à 2040

puis environ **15000 km** pour les décennies suivantes.

# TRANSITION VERS L'ELECTRIQUE

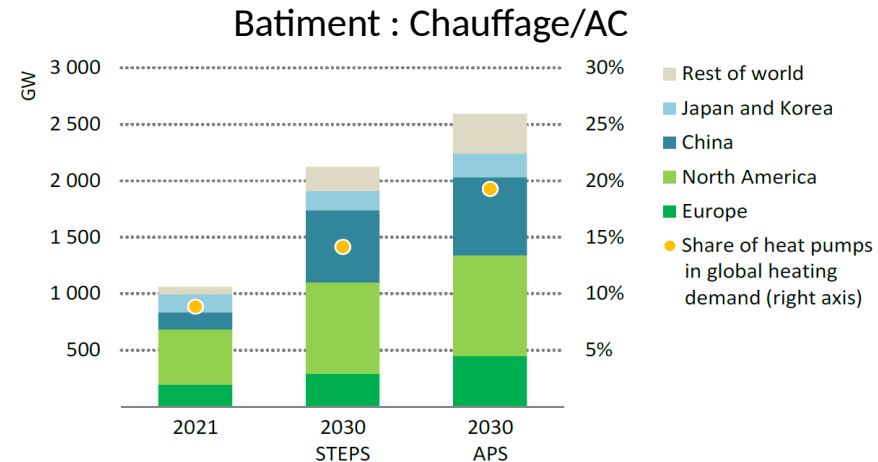
Augmentation

## Impact sur l'utilisation de l'électricité



Parc de voitures à batterie électrique et de voitures hybrides rechargeables dans le monde de 2005 à 2022

Source Statista



Capacité des pompes à chaleur dans le bâtiment par pays/région en 2021 et 2030 pour deux scénarios (APS (Announced Pledges Scenario) : governments around the world meet all announced energy, STEPS (Stated Policies Scenario) : the global energy system would evolve under the policies already in place today, provided they are backed by concrete implementation plans)

Source IEA : The future of heat pumps

# Impact sur l'utilisation de l'électricité

## Procédés industriels

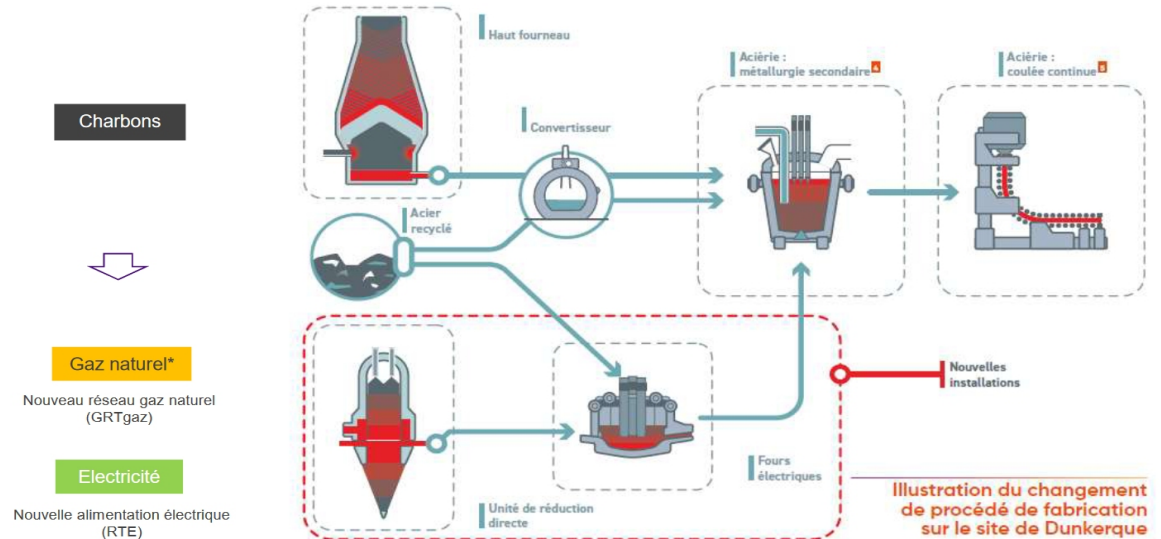
Production d'acier-site d'ArcelorMittal à Dunkerque

-2024 : Production de 15% des gaz à effet de serre d'origine industrielle au niveau national

-Installation industrielle innovante (Cout 1,8 M€ dont 850 m€ de l'état français) de « Réduction directe du minerai de fer » + deux fours électriques (200 MW)

TRANSITION  
VERS  
L'ELECTRIQUE

➡ Réduction de 5,7% des émissions industrielles nationales

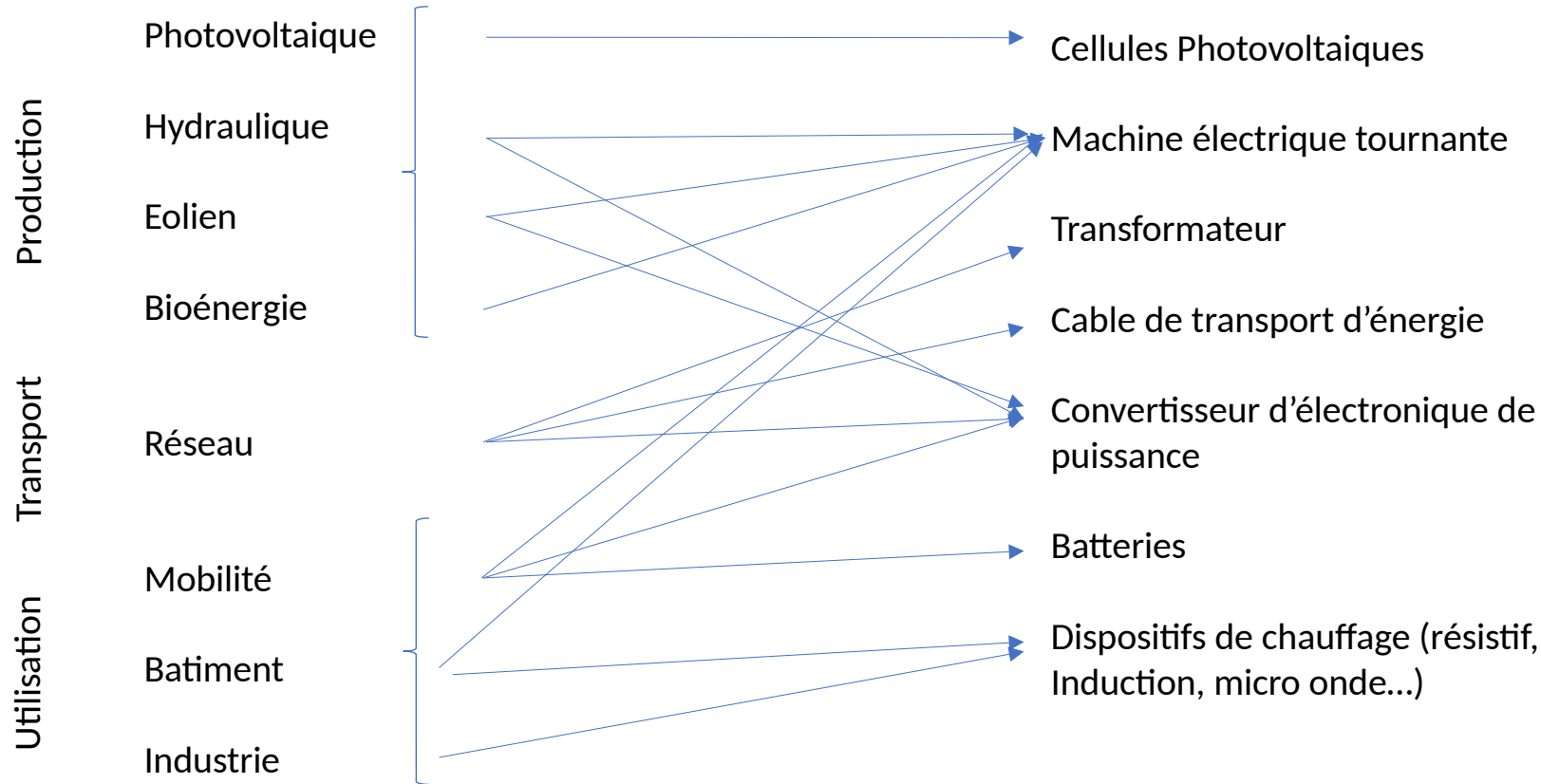


Une substitution de procédé de fabrication en amont de l'aciérie

Source ArcelorMittal : <https://www.spppi-cof.org/wp-content/uploads/2022/11/221116-s3pi-v1.pdf>

**TRANSITION  
VERS  
L'ELECTRIQUE**

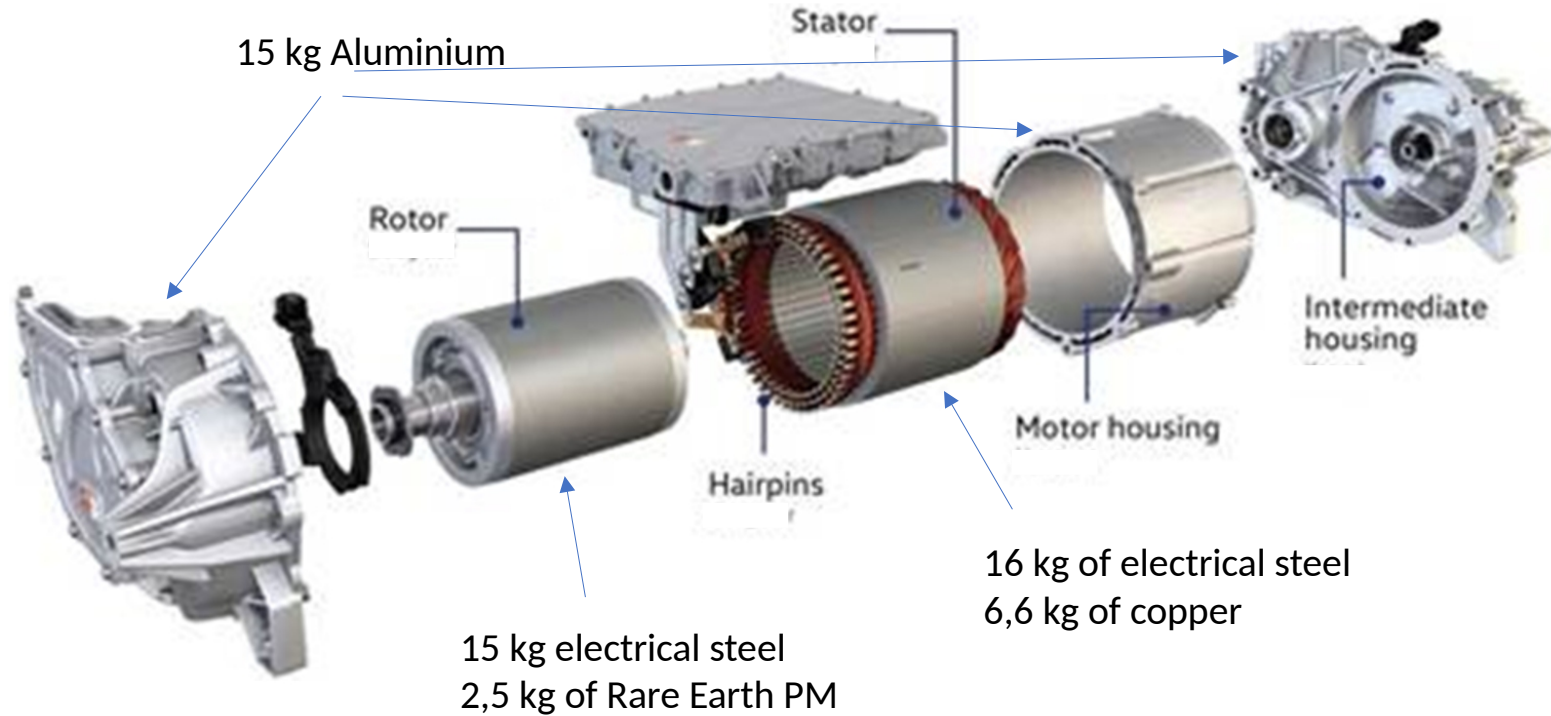
## Quels composants électriques ?



# Quel matériau pour quel composant ?

Moteur électrique pour la traction automobile

TRANSITION  
VERS  
L'ELECTRIQUE



# Quel matériau pour quel composant ?

Panneau photovoltaïque.

Matière	Quantité (T/MWc)
Béton	0
Acier	0,184
Cuivre	1,242
Aluminium	10,024
Silicium	2
Argent	0,02
Verre	45



Photovoltaïque sur bâti avec onduleurs en tonnes/MWc

Source ADEME : [https://data-transitions2050.ademe.fr/datasets?](https://data-transitions2050.ademe.fr/datasets?topics=EvluRRfH1DL9WMYfbg1jq)

[topics=EvluRRfH1DL9WMYfbg1jq](https://data-transitions2050.ademe.fr/datasets?topics=EvluRRfH1DL9WMYfbg1jq)

TRANSITION  
VERS  
L'ELECTRIQUE

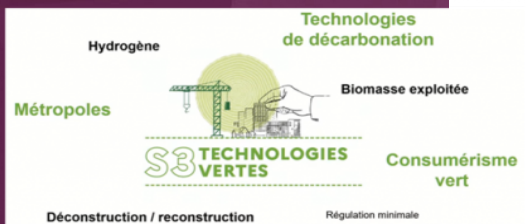
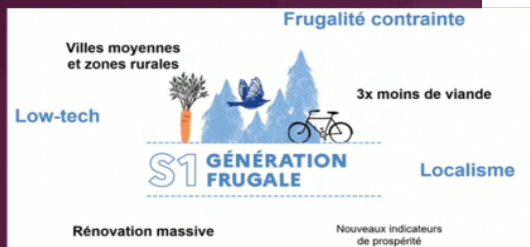
# Besoin en matériaux selon les 4 scénario ADEME en France

Besoins annuels en métaux t/an  
différents scénarios ADEME

Scénario	REE	Si	Ag	Ti	Li	Co	Ni	Graph.
S1	95	2 174	21	85	2 791	1 395	22 333	27 218
S2	158	6 268	62	85	4 029	2 014	32 239	39 292
S3 Nuc	132	7 534	75	608	5 392	2 696	43 138	52 575
S3 EnR	316	9 534	95	85	5 392	2 696	43 138	52 575
S4	316	9 701	97	1 269	7 711	3 855	61 695	75 191

Besoins annuels en grands matériaux et métaux t/an  
différents scénarios ADEME

Scénario	Béton	Acier	Cu	Al	Verre
S1	1 278 384	1 449 651	92 542	334 907	107 484
S2	2 342 164	1 925 108	124 002	451 221	214 669
S3 Nuc	2 357 149	2 197 367	148 201	567 449	262 279
S3 EnR	2 649 278	2 635 307	16 0821	582 067	307 279
S4	3 063 909	3 020 992	194 358	710 498	329 742



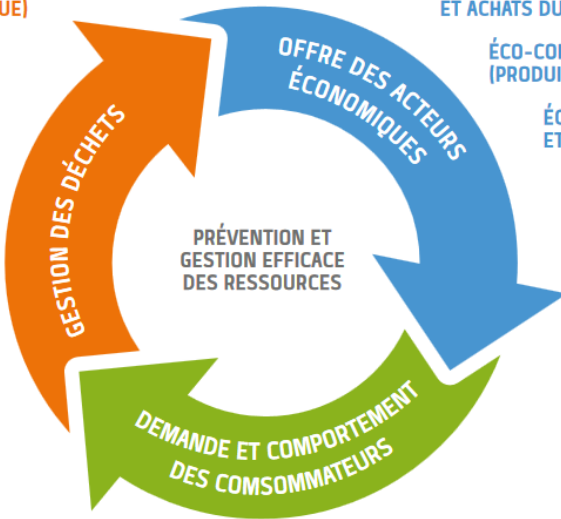
# Transitions ... MATÉRIAUX

ÉNERGIE = MATÉRIAUX => Économie Circulaire

Mines, Recyclage

## ÉCONOMIE CIRCULAIRE 3 domaines, 7 piliers

RECYCLAGE  
(MATIÈRE ET ORGANIQUE)



EXTRACTION/EXPLOITATION  
ET ACHATS DURABLES

ÉCO-CONCEPTION  
(PRODUITS ET PROCÉDÉS)

ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE  
ET TERRITORIALE

ÉCONOMIE DE  
LA FONCTIONNALITÉ

PRÉVENTION ET  
GESTION EFFICACE  
DES RESSOURCES

OFFRE DES ACTEURS  
ÉCONOMIQUES

DEMANDE ET COMPORTEMENT  
DES CONSOMMATEURS

ALLONGEMENT DE LA DURÉE D'USAGE

- > Réemploi
- > Réparation
- > Réutilisation

CONSOMMATION RESPONSABLE

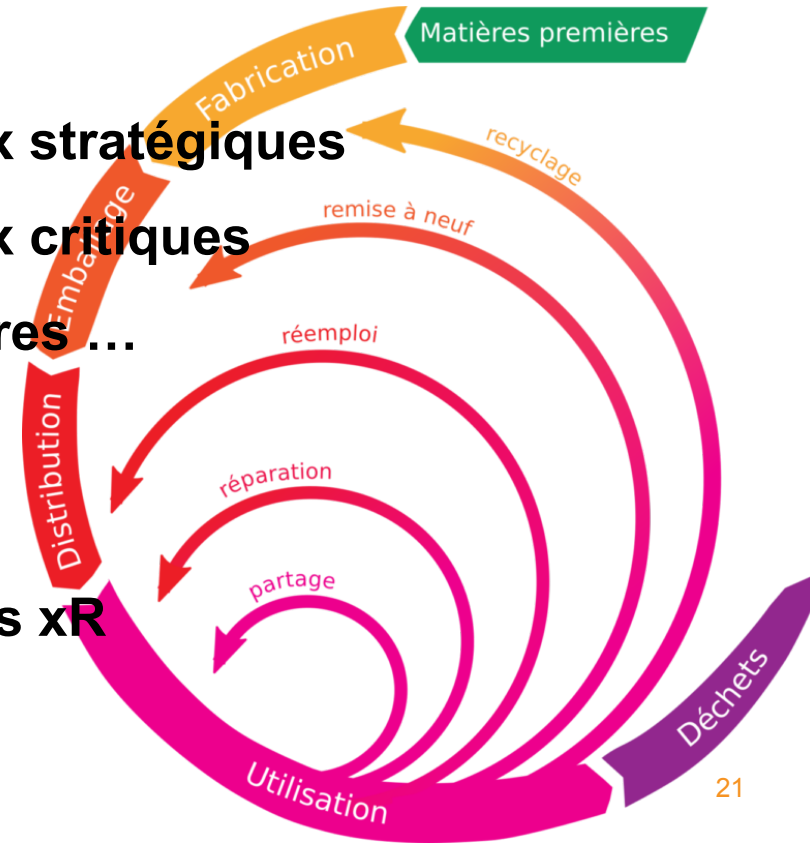
- > Achat
- > Consommation collaborative
- > Utilisation

Matériaux stratégiques

Matériaux critiques

Terres rares ...

Stratégies xR



# Évaluation des réserves minières

## exercice difficile

**MATÉRIAUX  
CRITIQUES**

**Passer de la connaissance  
des ressources aux  
évaluations des réserves**



« Gisements France » : Atlas des substances critiques et stratégiques, BRGM/RP-71133-FR, 12.2021

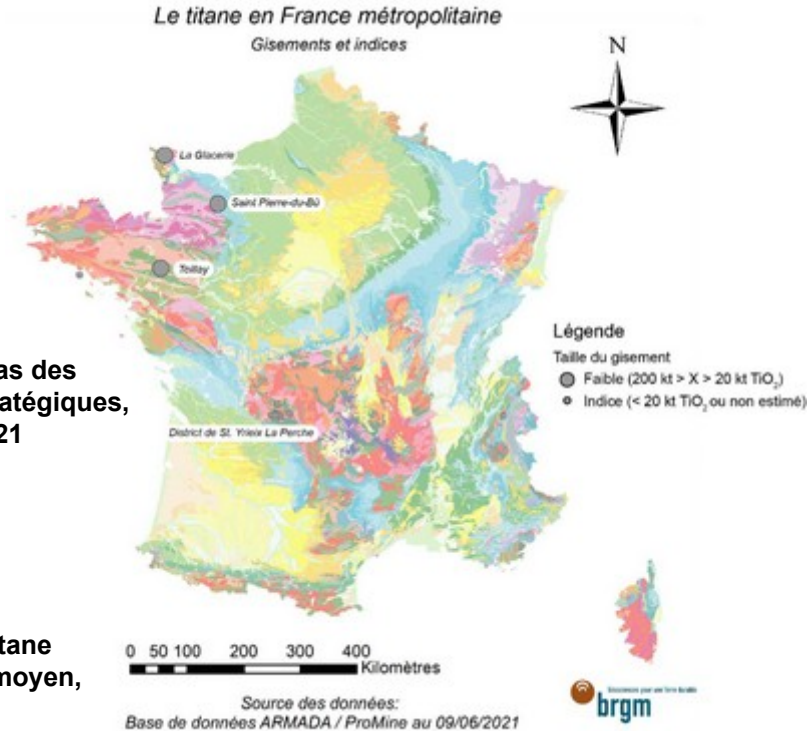
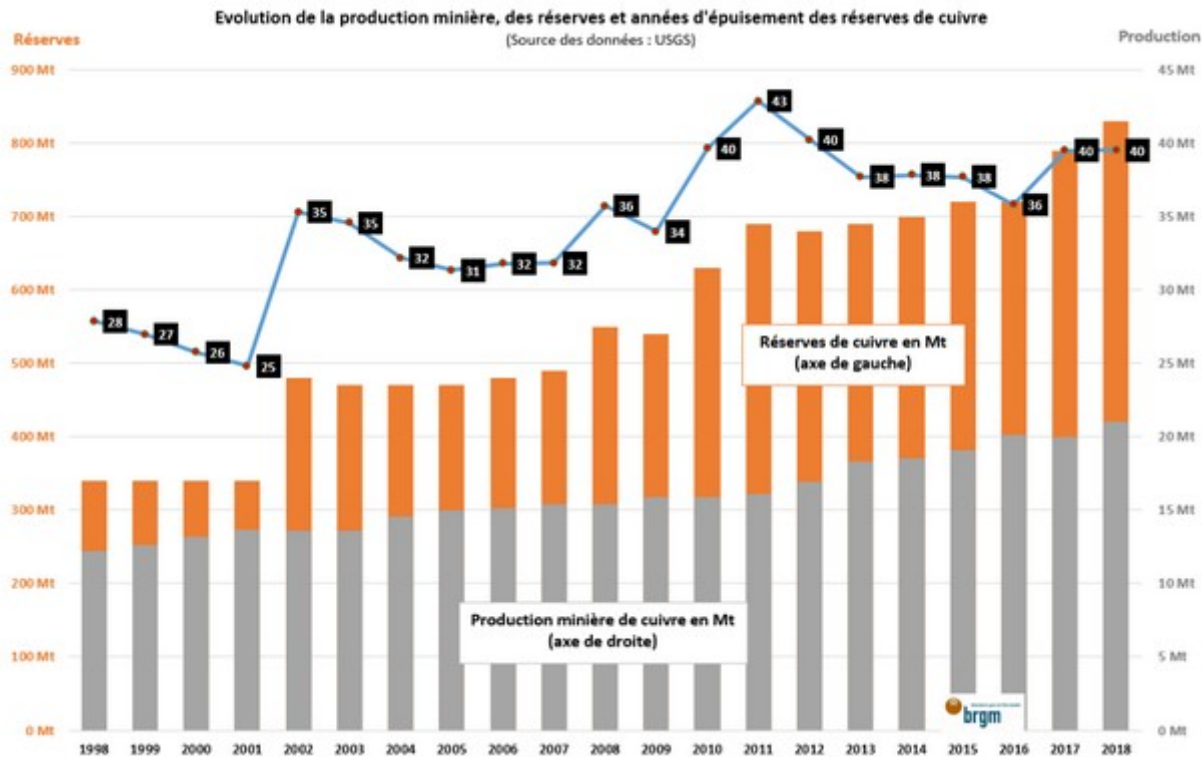


Tableau de Principaux gîtes de titane recensés en 2021 (C : gisement moyen, E : occurrence)

Nom du site	Production passée (t)	Ressources supposées (t)	Potentiel total (Prod.+Ress.)	Classe
Teillay 2	-	640 000,00	640 000,00	C
La Glacière	-	200 000,00	200 000,00	C
Saint Pierre-du-Bû	-	200 000,00	200 000,00	C
Piquette	66,00	-	66,00	E
<b>TOTAL (t TiO<sub>2</sub>)</b>	<b>66</b>	<b>1 040 000</b>	<b>1 040 066</b>	

Caractérisation des ressources et réserves minières. Source : A. Boubault, BRGM

# Projections sur les réserves minières : difficile exercice



**Chaque nouveau gisement ouvert réinitialise les projections**

En 2000 : 25 ans Cu

+2% prod/an + nouvelles réserves

=> 2018 40 ans

Pas tenable dans le temps

=> réduction production primaire, au profit des ressources secondaires

# Ressources minérales = Mines

- Extraction et Raffinage des métaux : enjeux sociaux / environnementaux
  - mines illégales : **travail des enfants**
  - impacts **multiformes** : pollutions, émission GES, perte de biodiversité
  - impact **croissant** : raréfaction des minerais
- Compétition de l'**usage de l'eau** et des **surfaces agraires**

Mine de Cuivre Kennecott - Utah - Us.



Mine clandestine de Cobalt - Congo

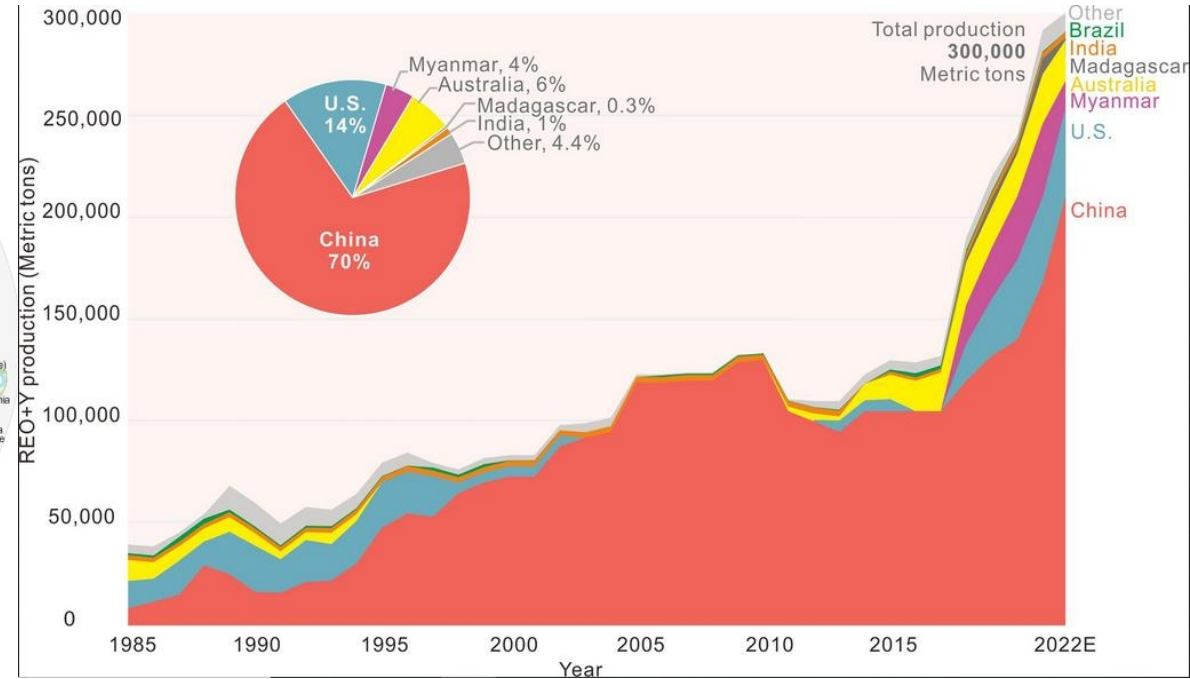


Travail légalisé des enfants dès 10 ans - Bolivie

<https://infos.ademe.fr/lettre-recherche-janvier-2022/les-metaux-un-enjeu-de-la-transition-energetique/>  
<https://theshiftproject.org/article/pour-une-sobriete-numerique-rapport-shift/>  
<https://eurometaux.eu/media/20ad5yza/2022-policymaker-summary-report-final.pdf>

Responsible Mining Foundation  
<https://www.responsibleminingfoundation.org/fr/>

# Oligopole : Terres rares



Liu, S. L., Fan, H. R., Liu, X., Meng, J., Butcher, A. R., Yann, L., ... & Li, X. C. (2023). Global rare earth elements projects: New developments and supply chains. *Ore Geology Reviews*, 105428.

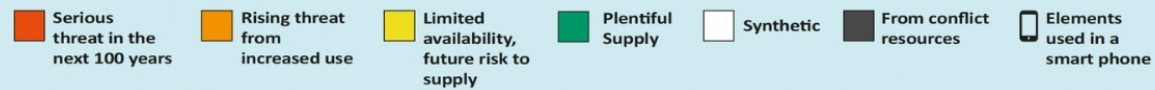
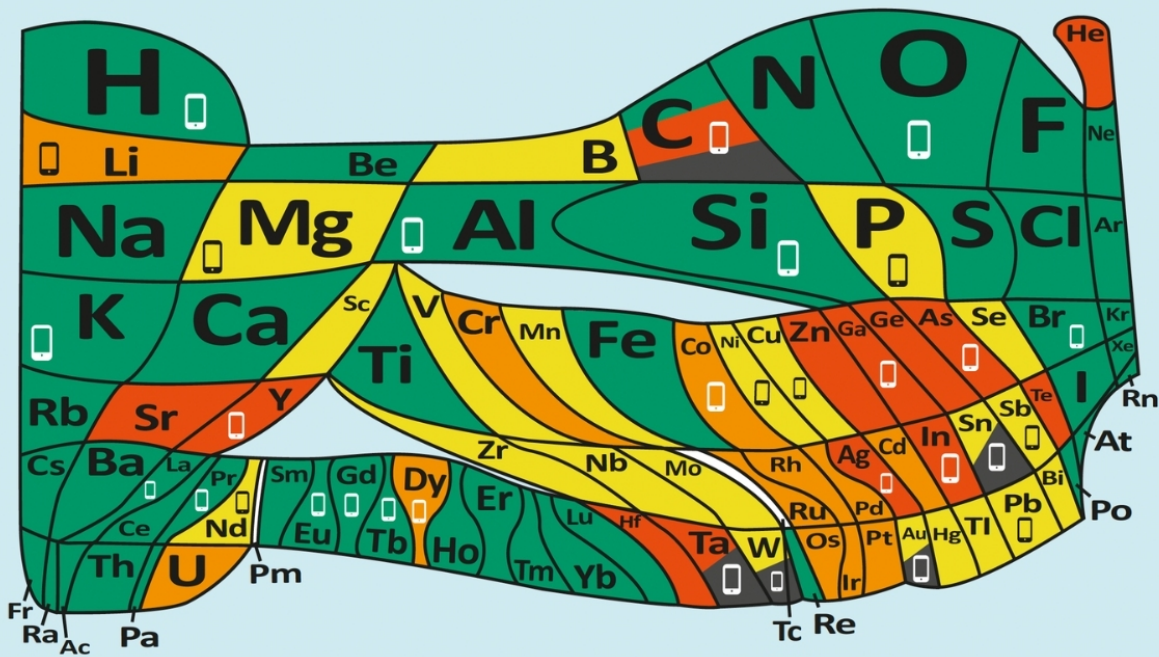


# Besoin / Gisement / Recyclage ... Est-ce durable ?

## ELEMENTS OF A SMARTPHONE



## The 90 natural elements that make up everything How much is there? Is that enough? Is it sustainable?



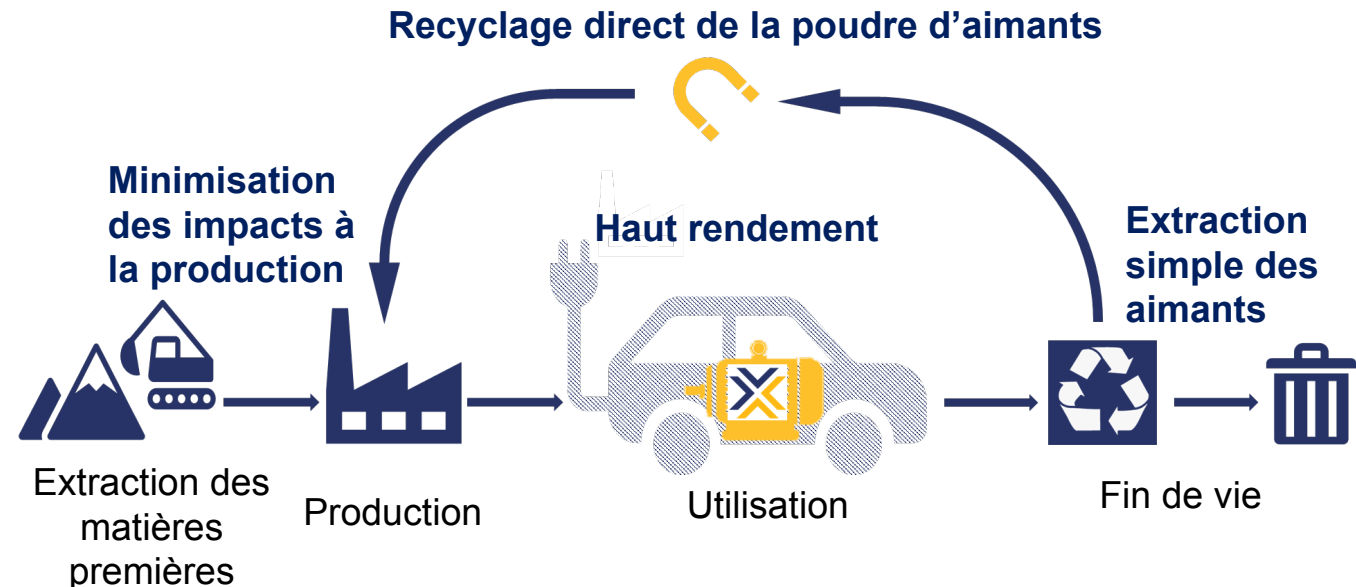
Read Support Notes and play the video game <http://bit.ly/euchems-pt>

Projet HE MAXIMA (2023-2027/5.6 M€) Conception et fabrication d'une machine électrique à flux axial modulaire pour l'automobile à faible impact environnemental

Coordinateur ENSAM avec  L2EP  
Laboratoire d'électrotechnique et  
d'électronique de puissance de Lille

 I2M  
BORDEAUX

 MSMP  
Mechanics, Surfaces  
and Materials Processing



# Discussion d'ouverture : Usage en pédagogie

---

## Lien avec d'autres UE

- EEA
- Énergétique
- Matériaux
- Conception
- Management, Gestion d'entreprise

## Activités

- Analyser des systèmes  
Démonter => indices réparabilité  
Nomenclature / Fonctions  
Représenter / modéliser le fonctionnement
- Chercher la nature des composants  
Matériaux  
Fournisseurs  
Alternatives (composant / solution)

# Economie Circulaire et transition environnementale

---

## 3 WEBINAIRES

### Sommes nous en capacité d'assurer les transitions nécessaires ?

14/03 : 1. **Quels matériaux pour quels systèmes : vers un monde plus électrique**  
S.Clenet – N.Perry Moteur électrique

11/04 : 2. Les Flux de Matières, criticité des ressources et économie circulaire  
T.Bauer – N.Perry Batterie électrique

16/05 : 3. Matériaux pour la transition et évaluation en ACV(s)  
C.Charbuillet – T.Reyes Véhicule électrique

## Questions

## Merci de votre attention