

Atelier MEDEEE FOCUS n°4

Mardi 31 janvier 2023 – Bâtiment ESPRIT - hybride

La contrainte des matériaux critiques dans le design des machines électriques

10h10 Pitches projets



Machine à reluctance variable à flux axial et à tôles à grains orientés – **Université de Lille, laboratoire L2EP**



Machine électrique à ruban aluminium anodisé – **Université d'Artois, laboratoire LSEE**



Approche multiphysique pour machine synchronreluctante – **Université de Technologie de Compiègne, laboratoire Roberval**



Projets ECOWSING et JEOLIS - **JEUMONT Electric**

10h50 Dépasser la contrainte des matériaux critiques en génie électrique

Table-ronde animée par S. Drouart, Responsable de projets R&D au pôle MEDEE

avec A. Tounzi, Enseignant-chercheur à l'Université de Lille, laboratoire L2EP

R. Romary, Enseignant-chercheur à l'Université d'Artois, laboratoire LSEE

S. Vivier, Maître de conférences à l'Université de Technologie de Compiègne, laboratoire Roberval

11h45 Economie circulaire des matériaux critiques



M. Vouters, directeur adjoint du **pôle Team2**

Partie 1 – Pitch Projets

**Machine à reluctance variable à flux axial
et à tôles à grains orientés**



A. Tounzi, enseignant-chercheur à l'Université de Lille,
laboratoire L2EP





Contexte
environnemental



Machines à
aimants

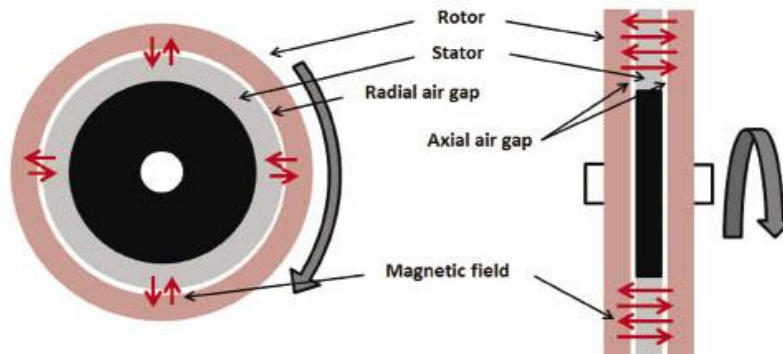
Autres
technologies

S'affranchir
des aimants



Puissance
volumique

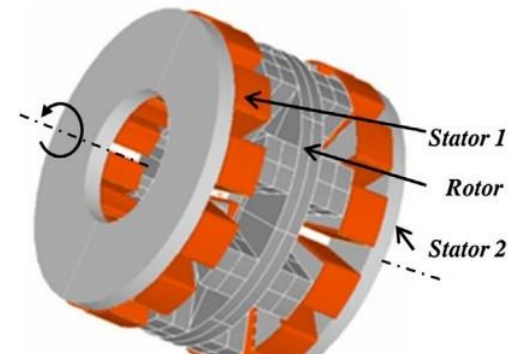
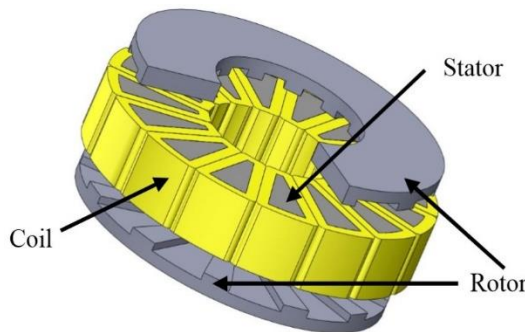
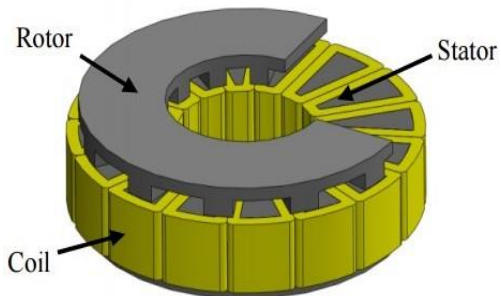




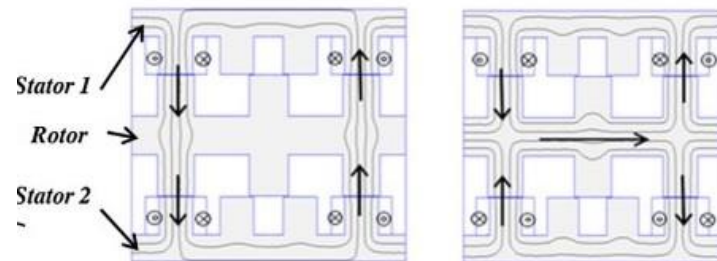
- 1 stator et 1 rotor
- Efforts axiaux -

- 1 stator et 2 rotors :
- Thermique -

- 2 stators et 1 rotor :
- Thermique +

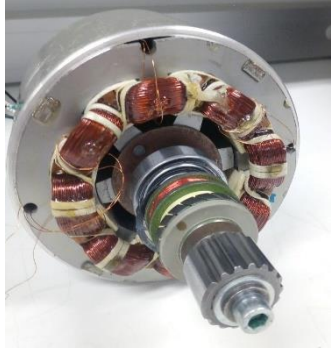


2 trajets de flux possibles



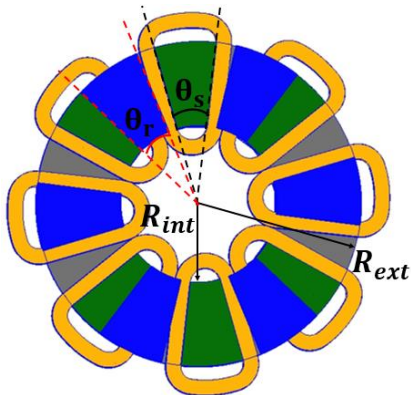
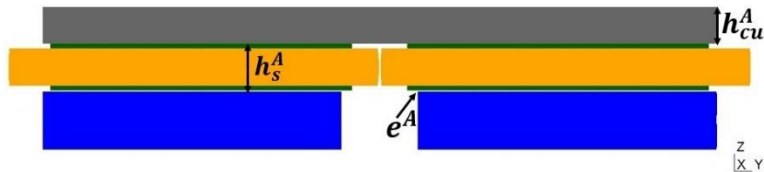
MRV-FR 4 phases 8/6

Tôles NO M400 - 50

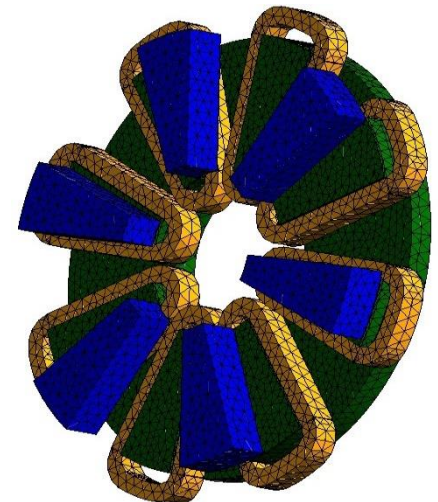


➤ Paramètres **maintenus similaires** :

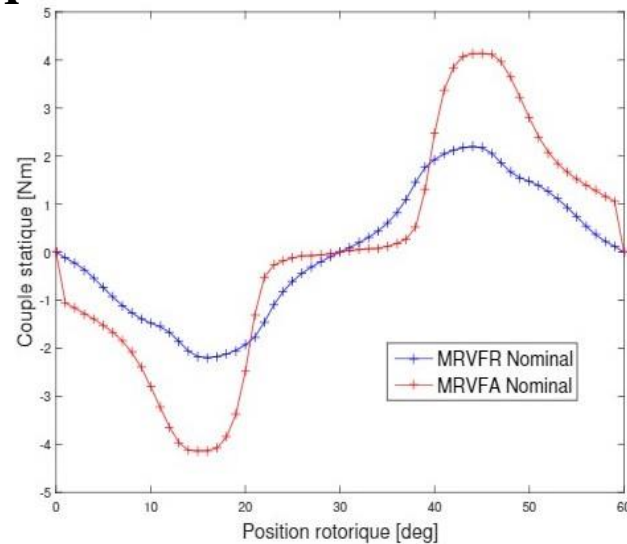
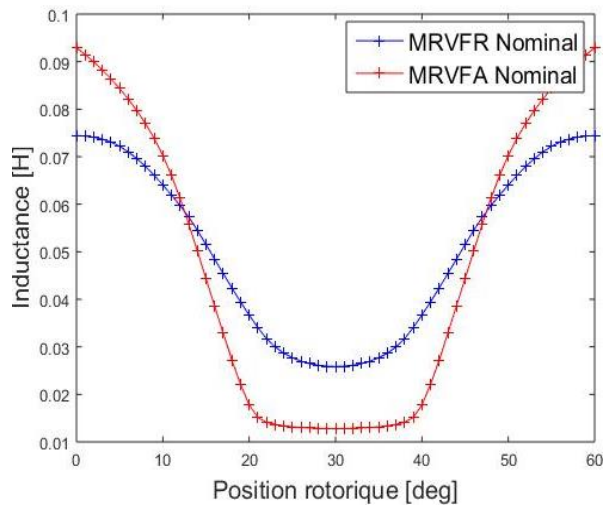
- Nombre de dents au stator et au rotor
- Ouverture angulaire des dents statorique et rotorique
- Rayon de l'arbre
- Epaisseur d'entrefer
- Nombre de spires par phase



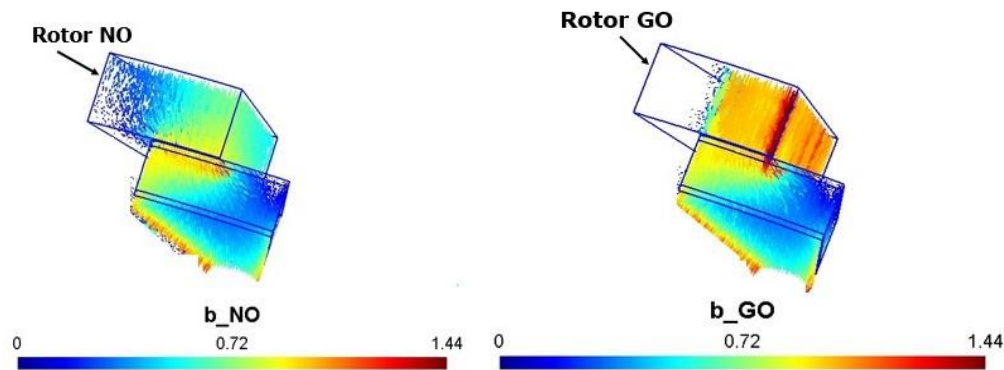
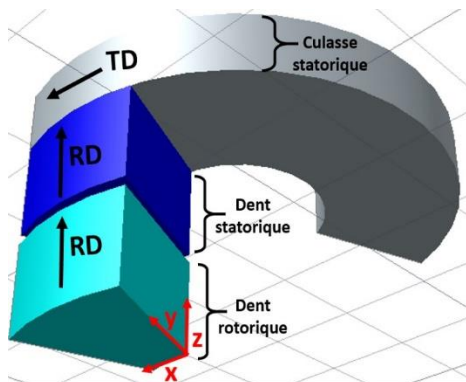
Longueur axiale réduite de **45%**
Diamètre externe de **6%**



MRV-FR vs MRV-FA



Caractéristiques	MRVFR	MRVFA
L en conjonction [mH]	74,43	92,89
Couple maximal [Nm]	2,2	4,06
Encombrement [cm ³]	1262	670

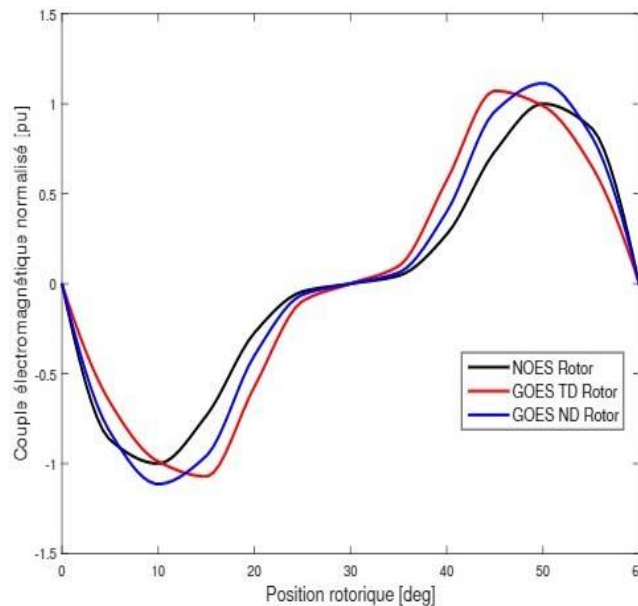
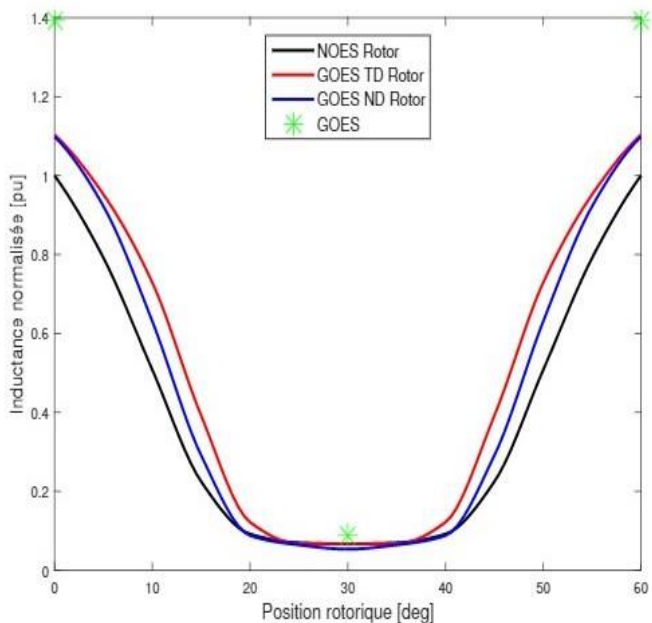


➤ 3 configurations simulées :

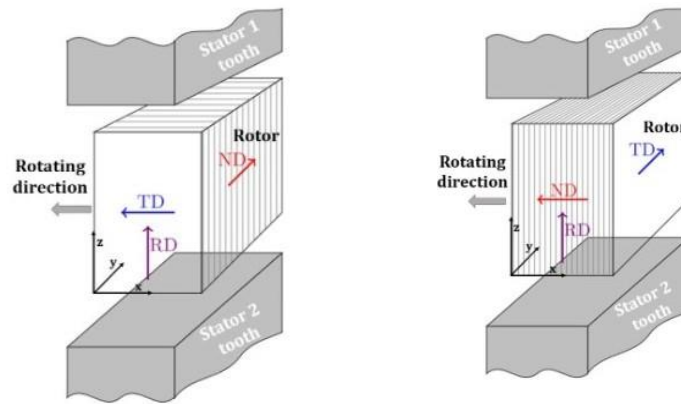
- NO au stator et au rotor
- NO au stator et GO au rotor (RD et TD)
- NO au stator et GO au rotor (RD et ND)



2 points avec acier GO au rotor et stator

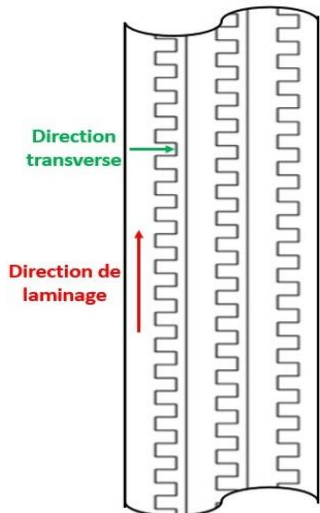


Configuration	C_{max} [%]	C_{moyen} [%]
1) RD et TD	7,2	16
2) RD et ND	11,4	14,7



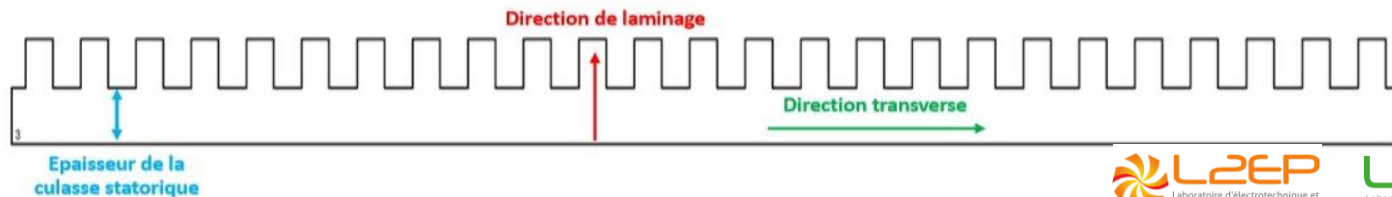
➤ Rotor :

- Dents encapsulées dans une structure amagnétique
- Une partie des tôles a une longueur variable (profil trapézoïdal)
- Morceaux de tôles insérées dans un plateau d'aluminium anodisé

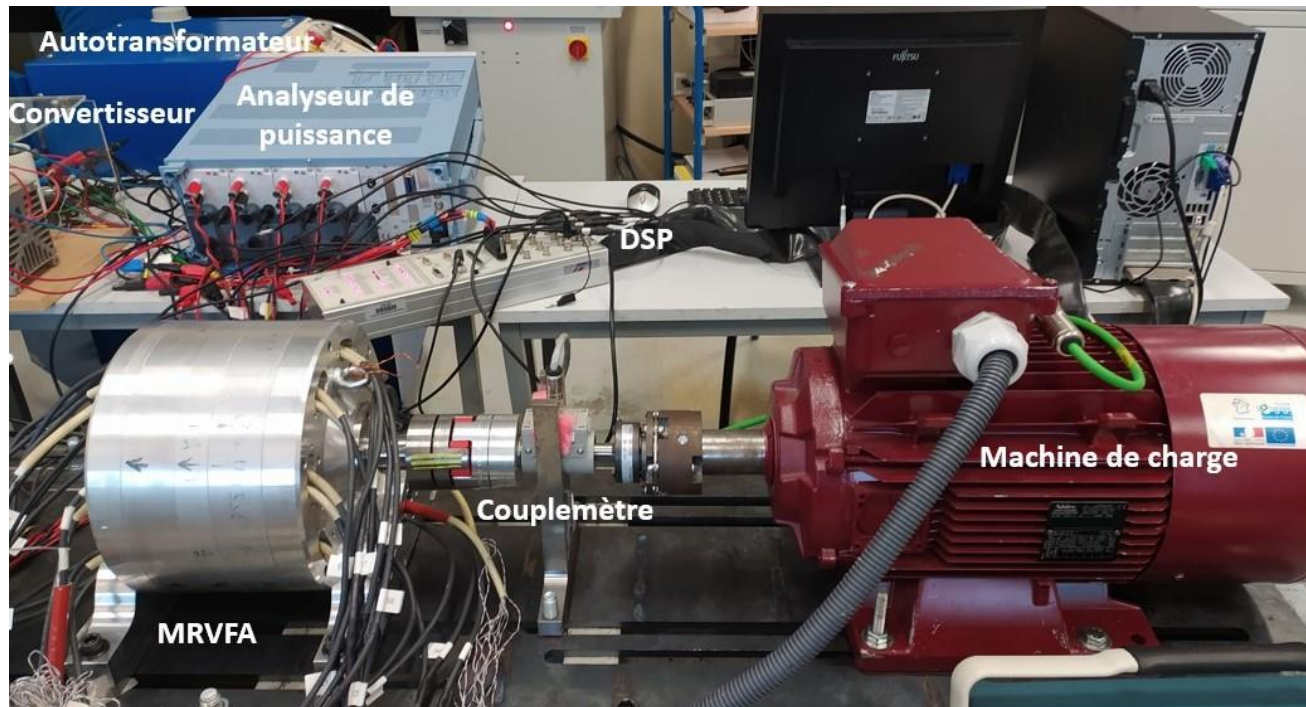


➤ Stator :

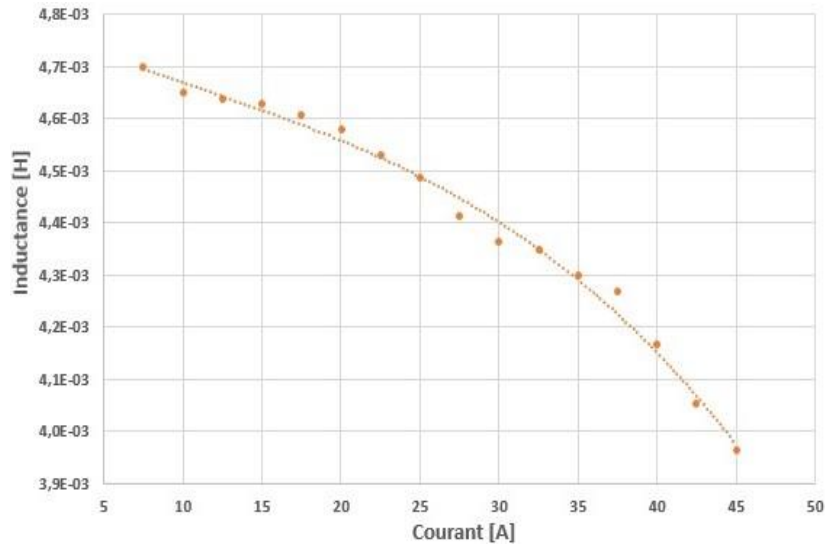
- entièrement en acier GO sans **segmentation**
- Bandelettes découpées dans la largeur de la bande
- Bandelettes enroulées de manière à créer des dents trapézoïdales



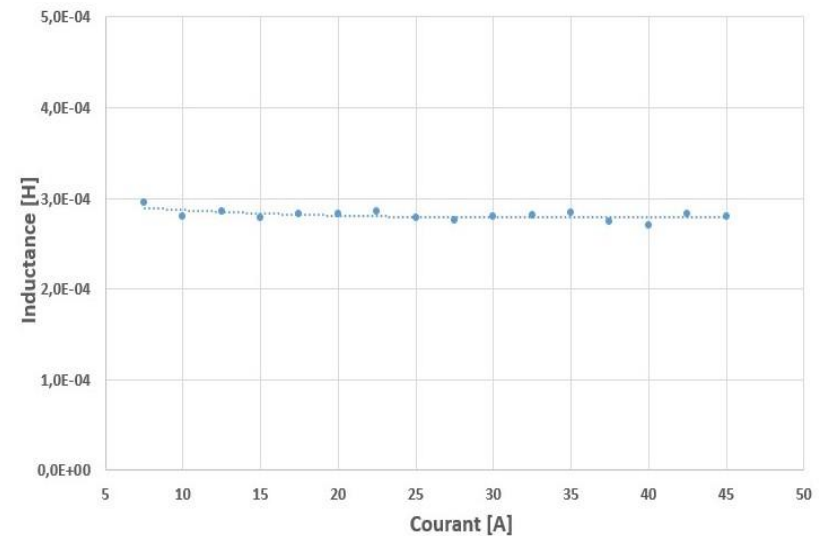
- MRVFA 8/6 à tôles GO
- MSAP (machine de charge) (4500 tr/min)
- Convertisseur de puissance à IGBT (4 ponts en H)
- Autotransformateur et analyseur de puissance
- Couplemètre
- Moyens de mesure (thermocouples, capteurs de courant, ...)



- Evolution de l'inductance **en conjonction** en fonction du courant :
 - Effet de la saturation
 - Diminution de 16% à 45A



- Evolution de l'inductance **en opposition** en fonction du courant :
 - Peu de changement



- Essais en charge du prototype MRF-FA GO pour divers points de fonctionnements afin de quantifier les performances
- Essais à vide et en charge d'un second prototype de géométrie identique mais avec des matériaux GO au rotor et NO au stator pour divers points de fonctionnements pour quantifier ses performances
- Comparaisons des deux structures



Abdelmounaim TOUNZI

Enseignant-chercheur à l'Université de Lille

abdelmounaim.tounzi@univ-lille.fr

l2ep.univ-lille.fr

univ-lille.fr



Maîtrise Energétique des Entraînements Electriques

Partie 1 – Pitch Projets

Machine électrique à ruban aluminium anodisé



Laboratoire Systèmes Electrotechniques
et Environnement





UNIVERSITÉ D'ARTOIS



Par **R. Romary**, enseignant-chercheur à l'Université d'Artois, laboratoire LSEE

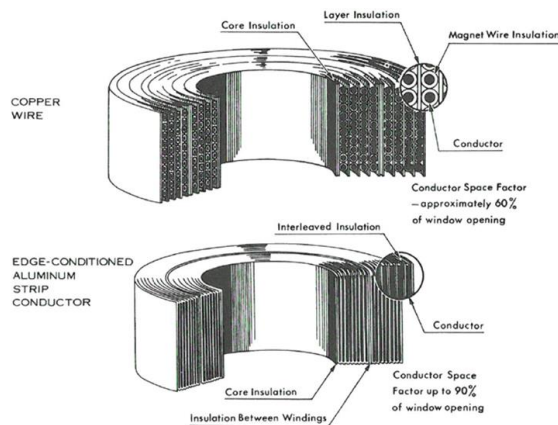
□ L'aluminium, le matériau du futur?

- L'aluminium est l'élément métallique le plus abondant dans la croûte terrestre. C'est le second métal utilisé après le fer.
- Il est apprécié pour sa malléabilité, sa résistance naturelle à la corrosion et pour son rapport légèreté/solidité.
- Il est utilisé dans le domaine du transport, de la construction, dans le secteur électrique ou le conditionnement
- Il est appelé à rester un métal phare de nos sociétés à l'horizon 2050, particulièrement dans le cas d'un scénario climatique compatible avec les objectifs de l'Accord de Paris.
- Mais il reste en un matériau en tension
 - ✓ 34% de criticité dans un scénario à +4°C en 2050
 - ✓ 87% de criticité dans un scénario à +2°C en 2050 (consommation x9 par rapport à aujourd'hui)
- Le recyclage est un élément clé de la stratégie d'approvisionnement.
 - ✓ L'aluminium présente l'avantage d'être recyclable à l'infini
 - ✓ 1/3 de la consommation européenne est satisfaite via le recyclage
- 
 - La fabrication de l'aluminium a un fort impact environnemental:
 - ✓ L'énergie représente 35% du coût de l'aluminium
 - ✓ La production d'aluminium est responsable de 2% des émissions de CO₂
 - ✓ La production d'1T d'aluminium génère 7T de CO₂ en Europe (objectif : descendre à 2,5%)
- 
 - L'aluminium est soumis à des tensions géopolitiques

sources : IFPEN

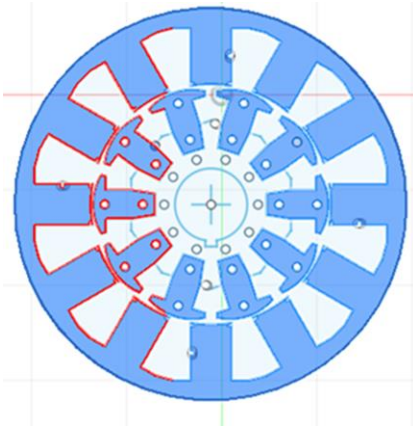
□ Avantages de la machine à ruban aluminium anodisé dans les machines électriques

- isolation constituée d'une couche d'oxyde d'aluminium issue d'une réaction électrochimique réalisée sans solvant, donc plus écologique que pour l'émaillage conventionnel
- L'isolation permet de supporter des températures élevées, jusque 350°C, contre 250°C pour les isolations organiques classiques
- Bien adapté aux bobinages dentaires, il peut être directement utilisé en bobine dans les stators des machines électriques à flux radial ou axial.
- présente un taux de remplissage maximisé (90%) et des têtes de bobines très courtes qui minimisent les pertes joules
- Naturellement ordonné, il minimise la tension entre spires

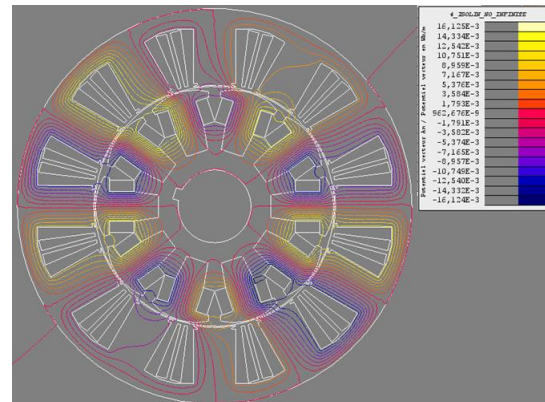


□ Conception d'une machine 40kW, 4000trs/min

- Machine 12/10 à bobinage concentrique
- Le stator et les rotor sont à bobines à ruban aluminium anodisé
- Le fonctionnement à haute température permet d'avoir une machine à forte puissance massique.
 → Machine conçue et réalisée dans le CPER CE2I (démo2)



Diamètre interne stator : 126mm
 Diamètre externe stator : 206mm
 Longueur utile : 150mm



Simulation par éléments finis

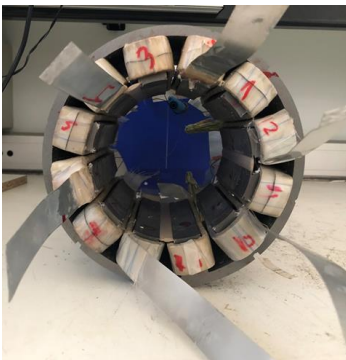
Configuration	1	2	3	4
Current rotor I_r	30 A	25 A	20 A	15 A
Current stator (peak) I_s	80 A	92 A	112 A	157 A
Rotor Joule losses	1800 W	1264 W	812 W	458 W
Stator Joule losses	356 W	471 W	700 W	1372 W
Stator iron losses	420 W	420 W	425 W	538 W
Rotor iron losses	48 W	48 W	48 W	48 W
Torque (average)	76 Nm	77 Nm	77 Nm	76 Nm
Rotor highest temperature (winding)	517°C	406°C	329°C	309°C
Stator highest temperature (winding)	269°C	237°C	223°C	263°C

Performances de la machine

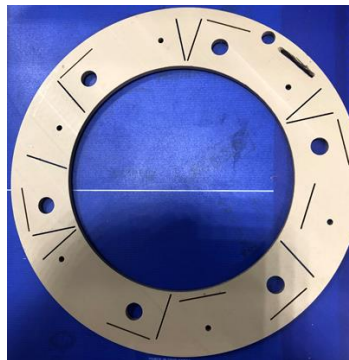
Les verrous technologiques

Remise en cause des procédures actuelles de construction des machines

- Réalisation du circuit magnétique
- Insertion des bobinages
- Connectique
- Choix des roulements (haute température)
- Maitriser les phénomènes de dilatation



Stator + bobines

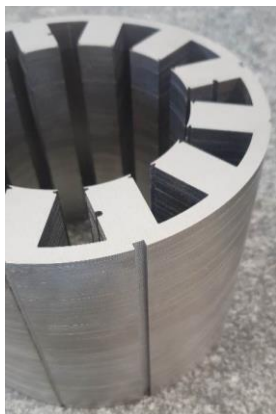
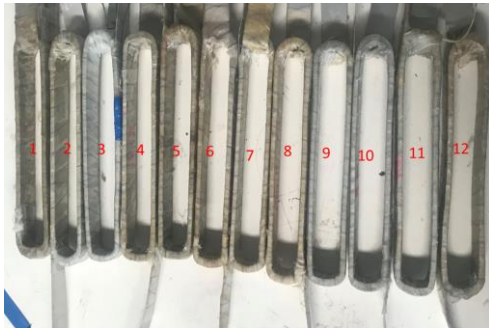


Anneau de connexion+



Anneau de connexion
au rotor

□ Les phases de fabrication



□ Conditions pour le déploiement à grande échelle des machines à ruban aluminium anodisé

- Améliorer la recyclabilité de l'aluminium : à prévoir dès la phase de conception.
- Créer une filière de recyclage.

- Améliorer la fiabilité qui est encore méconnue, surtout à haute température
- Résoudre les verrous technologiques de fabrication (connectique, roulements....)

- Etudier la pertinence et la faisabilité sur les machines de plus forte puissance.
- Etudier la faisabilité en haute tension

- Maitriser la tension sur l'approvisionnement en aluminium
- Limiter son impact environnemental

Raphaël ROMARY

Enseignant-chercheur à l'Université d'Artois

raphael.romary@univ-artois.fr

univ-artois.fr



Maîtrise Energétique des Entraînements Electriques

Partie 1 – Pitch Projets

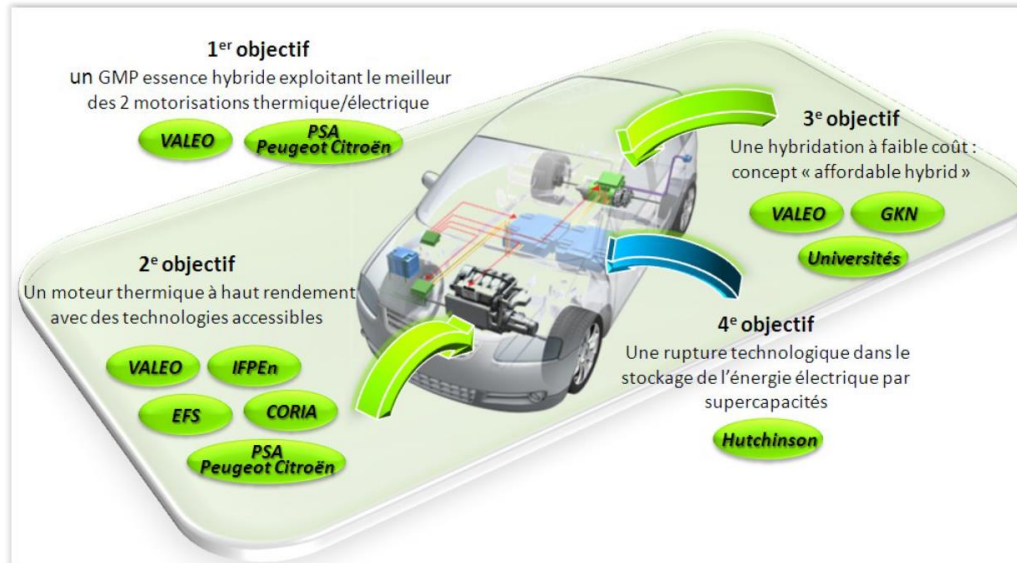
Approche multiphysique pour machine
synchronoréductante



Par **S. Vivier**, Maître de conférences à l'Université de
Technologie de Compiègne, laboratoire Roberval

UN PROJET « ACTUEL »: ESSENCYELE

- Moteur ESSENCE injection directe hYbride Electric abordableLE
 - Réduction de l'impact du transport urbain sur l'environnement
- Electrification des véhicules
 - Hybridation à faible coût du Groupe Moto-Propulseur (GMP)
- Réduction de l'utilisation des terres-rares dans les moteurs électriques



Thèses (UTC):

Contribution au dimensionnement optimal d'une machine électrique sans aimant pour la propulsion de véhicules hybrides –
Leïla Nguimpi Langue - 2018

Contribution à la modélisation mécanique et thermique d'une machine synchronoréductante pour une application véhicule -
Iman Kleilat laaly - 2021

Coordonnateur

Valeo

Partenaires

HUTCHINSON, EFS, ifp Energies nouvelles, GKN DRIVE LINE, SATIE, L'ESPE, CORIA, PSA PEUGEOT CITROËN, Laplace, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Université de Technologie de Compiègne, utc

Machine électrique, Supervision Chaîne de traction & Contrôle Moteur, Onduleur, Convertisseur de tension

Démonstrateur Peugeot 207 avec système mild-hybrid Hybrid4All

PROBLÉMATIQUES DES MATÉRIAUX CRITIQUES

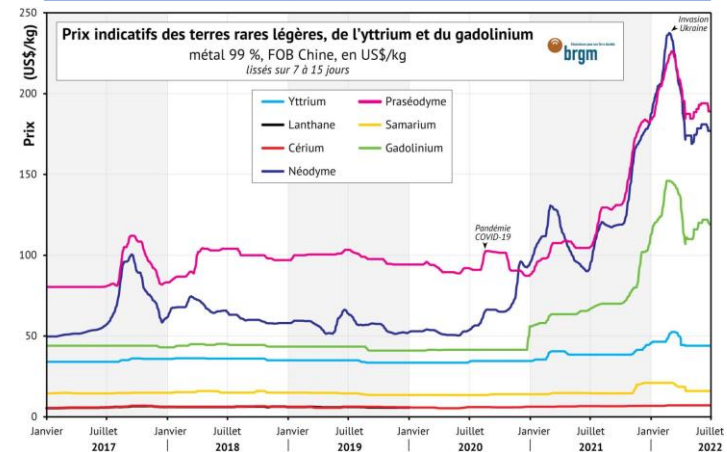
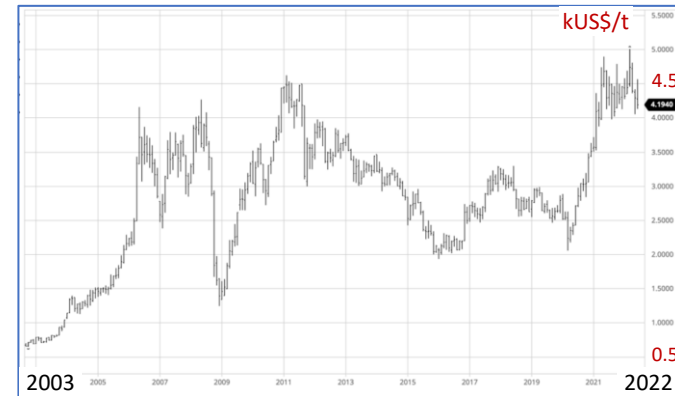
- **Coût financier**

- Dépend des stocks et de la demande
- Prix élevés & croissants
 - Aluminium, Cuivre
- + Prix fluctuants
 - Terres rares (aimants)
 - Nd (-Fe-B), Sm (-Co)

- **Coût écologique**

- Extraction / Recyclage
- Lithium

Cours du cuivre (LME)

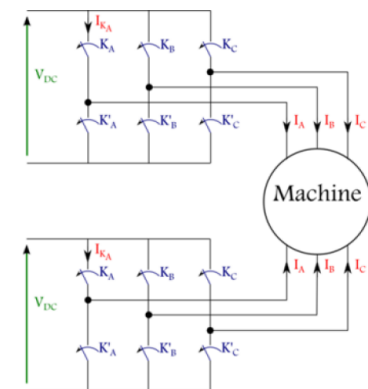
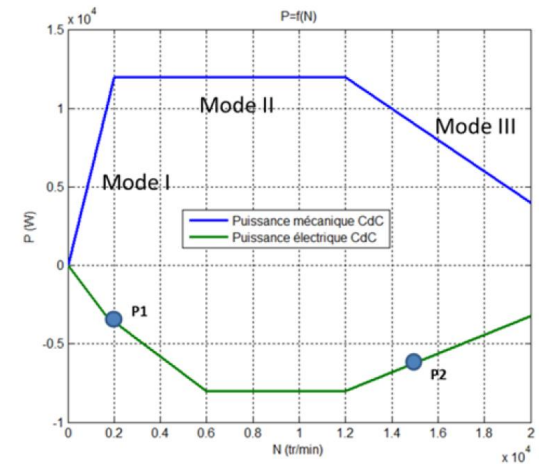


[<https://www.mineralinfo.fr/fr/ecomine/marche-des-terres-rares-2022-filieres-dapprovisionnement-aimants-permanents>]

EXEMPLE DE CAHIER DES CHARGES: PROJET ESSENCYELE

● Projet ESSENCYELE: un cahier des charges (très) contraint:









- Courbes de performances Couple-Vitesse à atteindre en modes Moteur et Générateur
- Alimentation par 2 systèmes triphasés
- Dimensions max: Diamètre extérieur x Longueur paquet = 144 x 70 mm (en supposant chignon de 30 mm de chaque côté)
- Possibilité d'utilisation de bobinage concentré (chignons plus courts)
- Refroidissement : air (second temps: air+eau)
- Vitesse maximale 18 000 tr/min, survitesse jusqu'à 22 000 tr/min
- Facteur de puissance à 55 N.m, 1 500 tr/min à 20°C > 0.85
- Masse maximale d'aimants terres rares : 200 g (si terres rares)
- Masse d'aimants ferrites: non limitée
- Densité de courant max en continu : 10 A/mm²
- Profondeur désaimantation B/Br des aimants >0.5 (à I_{max} et I_q=0)
- Inertie rotor: 6 g.m²
- Coefficient de remplissage : 50%, encoches à bords parallèles ou trapézoïdales
- Assurer le court-circuit
- Environnement : Température ambiante de 120°C (si eau: température de l'eau entre 85°C et 105°C)



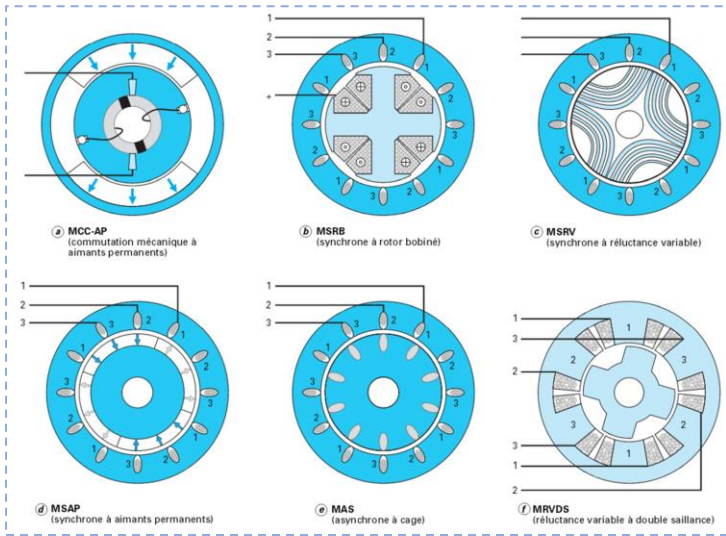
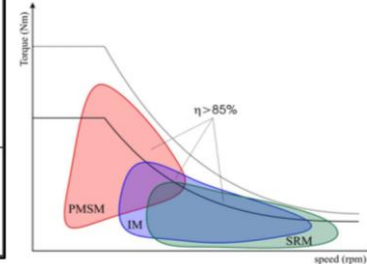
TYPE DE MACHINE ADÉQUATE...

● Tentative de classement des différents types de machines

- Critères de performances
- Critères de fabrication / **Matériaux utilisés**

Propulsion Systems				
Characteristics	DC	IM	PM	SRM
Power Density	2.5	3.5	5	3.5
Efficiency	2.5	3.5	5	3.5
Controllability	5	5	4	3
Reliability	3	5	4	5
Technological maturity	5	5	4	4
Cost	4	5	3	4
Σ Total	 22	 27	 25	 23

Thèse (LGEP): Méthodologies de conception optimale de systèmes de conversion électromécanique, Maya Hage Hassan, 2014



Techniques de l'Ingénieur



Machine Synchro-Réductante

● Avantages

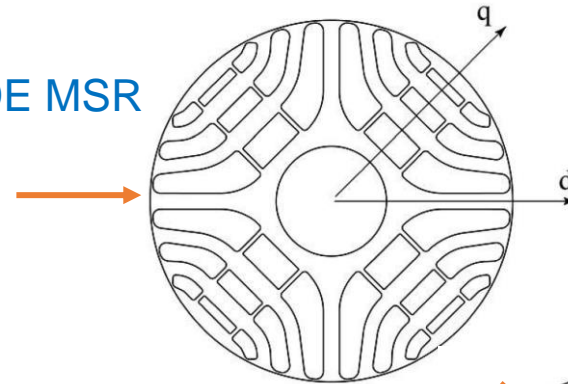
- Bonne tenue mécanique
- Coût de fabrication faible
- Pb thermique + simple

● Inconvénients

- Courts circuits magnétiques par les ponts magnétiques
- Possibles fortes ondulations de couple
- Facteur de puissance modeste
- Conception mécanique + complexe

COMPARAISON DE 3 TYPES DE ROTOS DE MSR

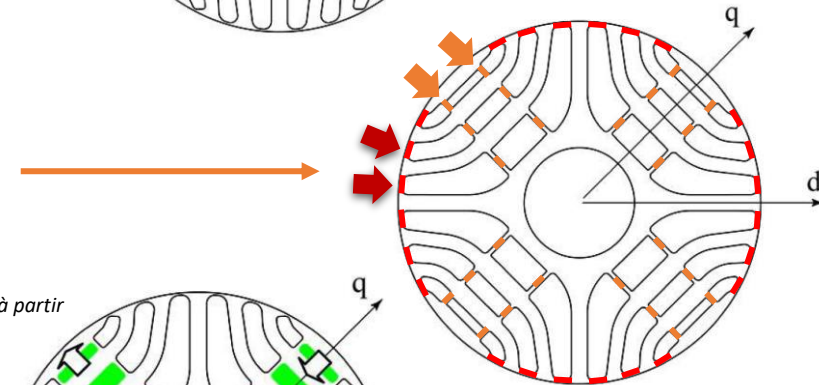
- Machine synchro-réductance à barrière de flux classique: SyRC



- Machine synchro-réductante utilisant le matériau « Dual Phase »: SyRDP

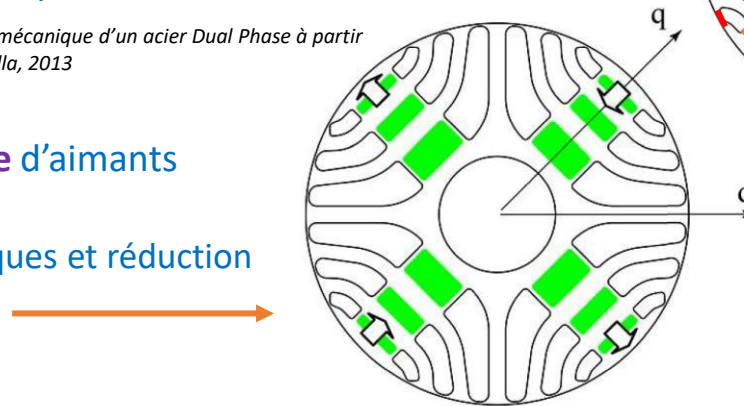
- « Dual Phase »: Matériaux magnétiques avec perméabilité modifiable (réduite) par traitements thermiques locaux
- Conservation des propriétés mécaniques

Thèse (ENS Cachan): Modélisation du comportement magnéto-mécanique d'un acier Dual Phase à partir de sa description Microstructurale, Frederick Sorel Mballa-Mballa, 2013

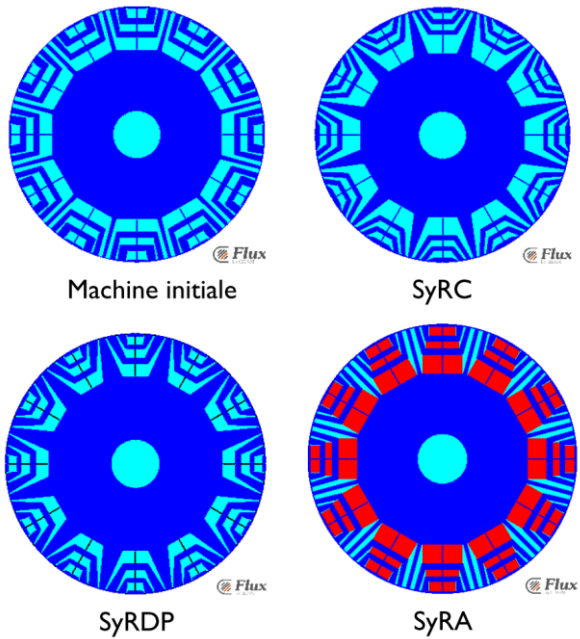


- Machine synchro-réductante assistée d'aimants ferrites: SyRA

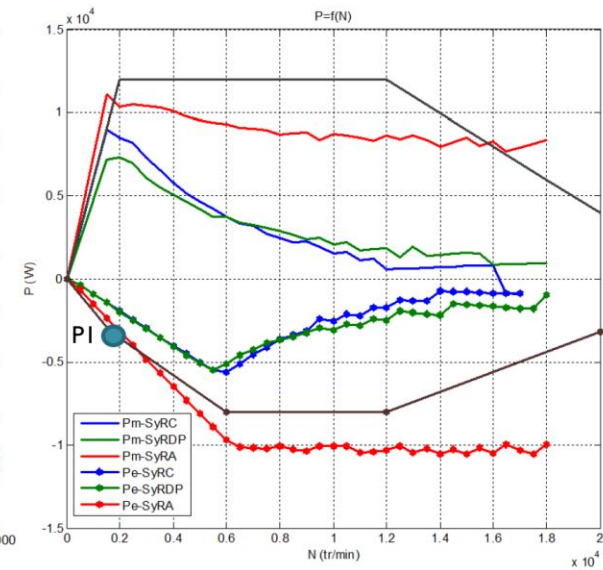
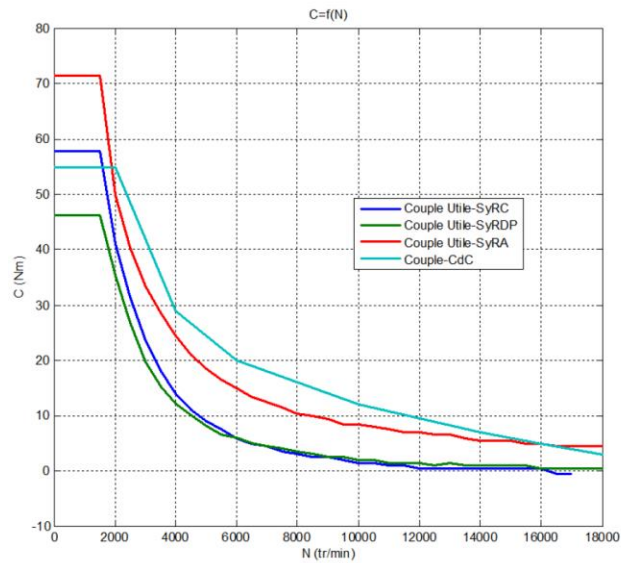
- Pré-saturation des ponts magnétiques et réduction de l'effet court-circuit



MSR: OPTIMISATION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

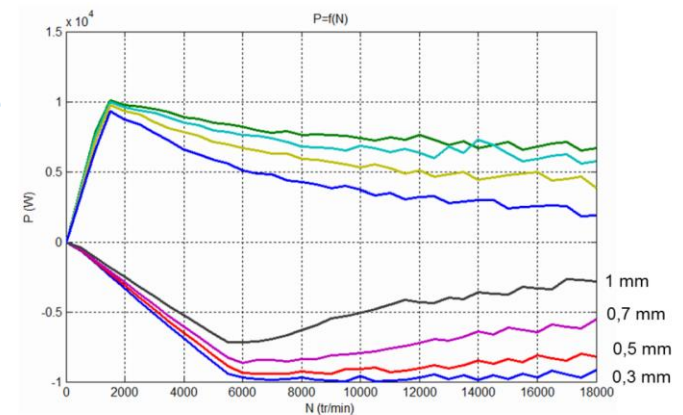
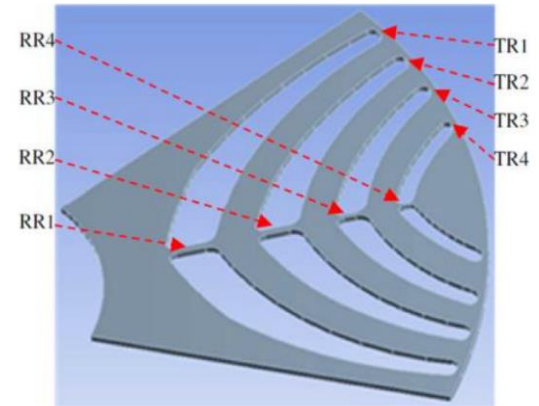
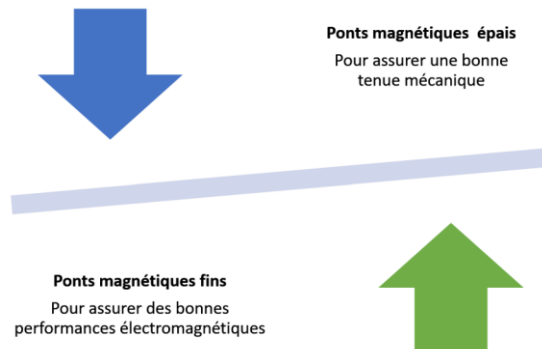


Machines	ξ	C_n [Nm]	ΔC_n [%]	C_{max} [Nm]	ΔC_{max} [%]
CdC	/	/	/	55	/
Machine initiale	2,7	18,3	8,5	45	23,9
SyRC	3,2	20	4,5	58	6,0
SyRDP	2,9	19	5,0	47	14,0
SyRA	2,9	28 18 (Br=0)	3,8	71	8,2



PROBLÉMATIQUE MÉCANIQUE: PONTS MAGNÉTIQUES

- Efforts centrifuges
 - Ponts fragilisés à vitesses élevées,
 - D'autant plus avec l'ajout de ferrites
- Nécessité de prendre en compte les contraintes mécaniques liées aux ponts magnétiques au cours du dimensionnement optimal
- Compromis:
 - Garantir les performances et assurer l'intégrité mécanique du rotor

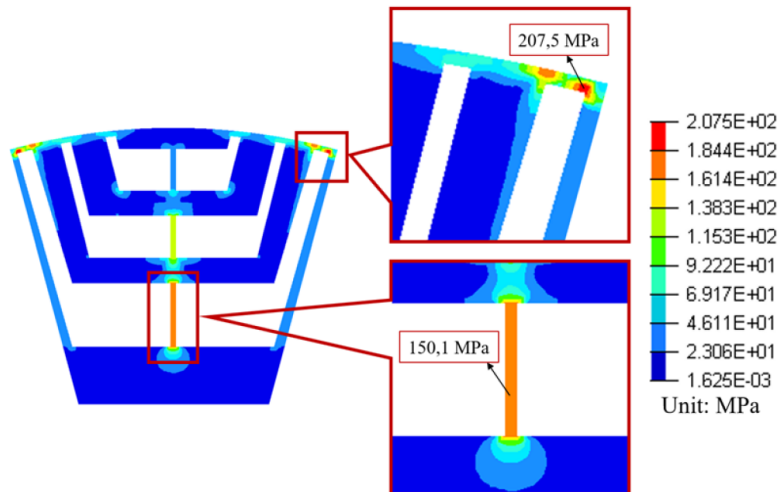


TENUE MÉCANIQUE DES PONTS (MAGNÉTIQUES) (1/3)

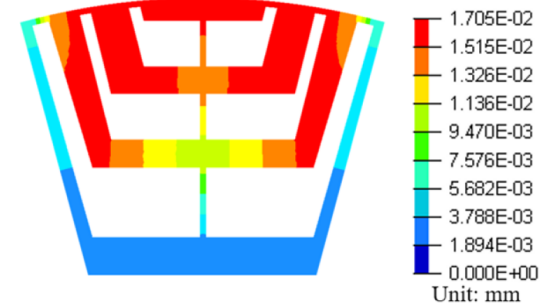
● Approche numérique

- Méthode des Éléments Finis
- Mécanique – domaine élastique

Contraintes maximales à une vitesse de 10 000 tr/min



Déplacement radial à une vitesse de 10 000 tr/min



Caractéristiques méca du matériau fer:

- Limite d'élasticité $\sigma_e = 410 \text{ MPa}$
- Limite de rupture $\sigma_r = 535 \text{ MPa}$

TENUE MÉCANIQUE DES PONTS (MAGNÉTIQUES) (2/3)

• Sous-système 1, poutre 1, force centrifuge:

→ Equations des appuis:

$$T_1 = \frac{F_{centrifuge}}{2}$$

$$M_1 = \frac{F_{centrifuge} \times L_1}{8}$$

→ Déplacement maximal:

$$v_{1M} = \frac{F_{centrifuge} \times L_1^3}{192 \times E \times I_e}$$

• Sous-système 2, poutre 1, action mutuelle:

→ Equations des appuis:

$$T_2 = \frac{-N}{2}$$

$$M_2 = \frac{-N \times L_1}{8}$$

→ Déplacement maximal:

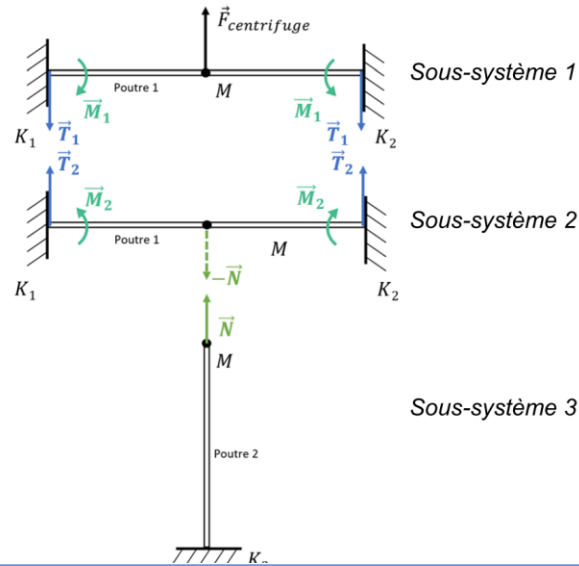
$$v_{2M} = \frac{-N \times L_1^3}{192 \times E \times I_e}$$

• Sous-système 3, poutre 2, action mutuelle:

→ Déplacement maximal:

$$v_{3M} = \frac{N \times L_2}{E \times S_c}$$

- L_1 représente la longueur de la poutre 1
- L_2 représente la longueur de la poutre 2



Approche analytique

Conditions cinématiques des trois sous-systèmes

$$v_{1M} + v_{2M} = v_{3M}$$

$$v_{1M} = \frac{F_{centrifuge} \times L_1^3}{192 \times E \times I_e}$$

$$v_{2M} = \frac{-N \times L_1^3}{192 \times E \times I_e}$$

$$v_{3M} = \frac{N \times L_2}{E \times S_c}$$

Equation de superposition

$$T = T_1 + T_2$$

$$M_f = M_1 + M_2$$

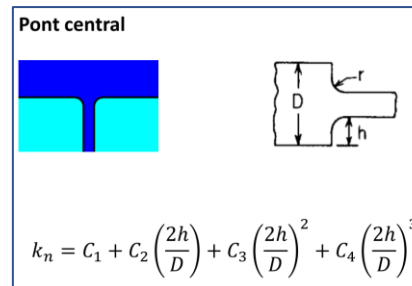
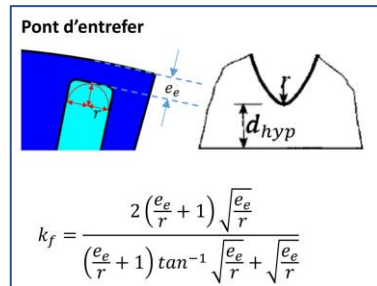
Equations finales

$$N = \frac{S_c \times L_1^3}{192 \times I_e \times L_2 + S_c \times L_1^3} \times F_{centrifuge}$$

$$T = \frac{96 \times I_e \times L_2}{192 \times I_e \times L_2 + S_c \times L_1^3} \times F_{centrifuge}$$

$$M_f = \frac{24 \times I_e \times L_1 \times L_2}{192 \times I_e \times L_2 + S_c \times L_1^3} \times F_{centrifuge}$$

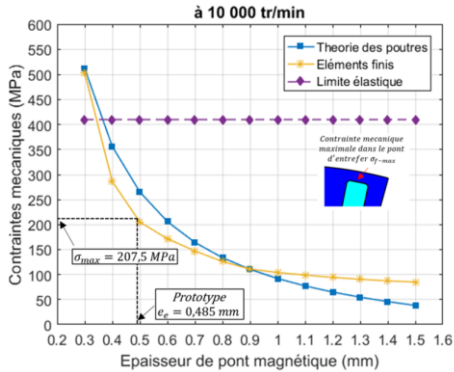
+ Facteurs de concentration



Déplacements
Efforts / Moments
Contraintes

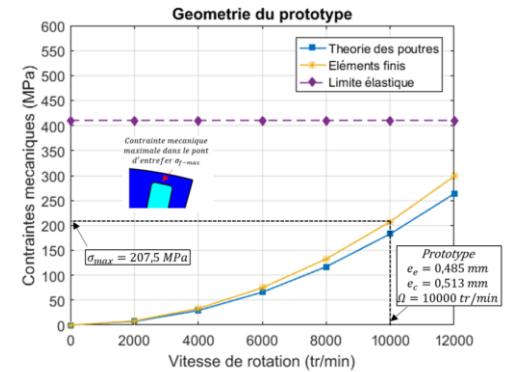
TENUE MÉCANIQUE DES PONTS (MAGNÉTIQUES) (3/3)

Contraintes mécaniques maximales dans le pont d'entrefer en fonction de son épaisseur à une vitesse de rotation fixe de 10000 tr/min

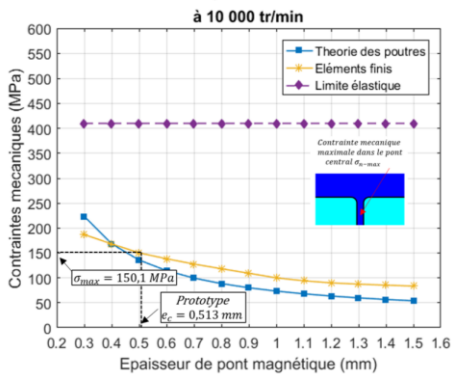


- Contraintes mécaniques
- Comparaisons entre:
 - Modèle numérique EF
 - Modèle analytique

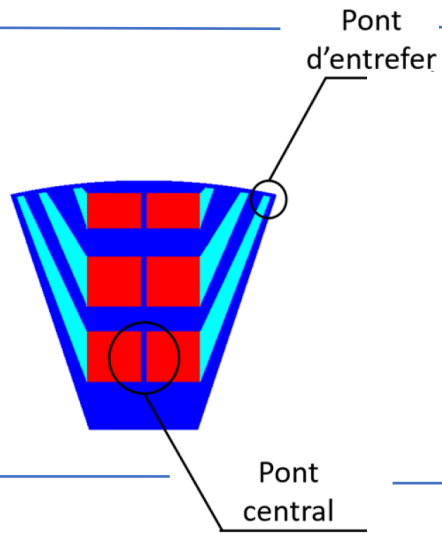
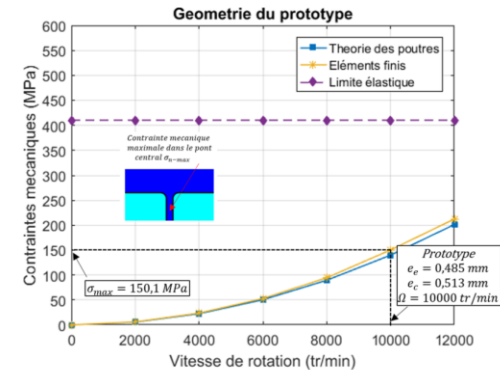
Contraintes mécaniques maximales dans les ponts d'entrefer en fonction de la vitesse de rotation pour la géométrie du prototype



Contraintes mécaniques maximales dans le pont central en fonction de son épaisseur à une vitesse de rotation fixe de 10000 tr/min



Contraintes mécaniques maximales dans le pont central en fonction de la vitesse de rotation pour la géométrie du prototype

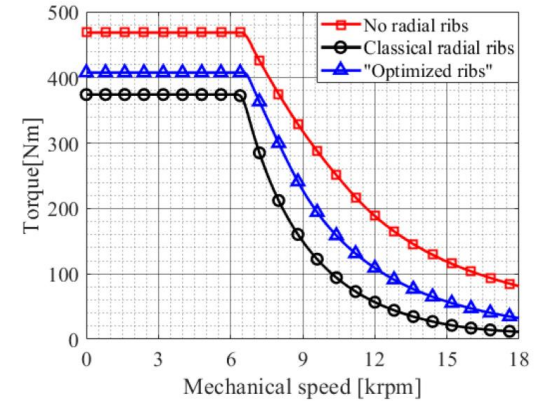
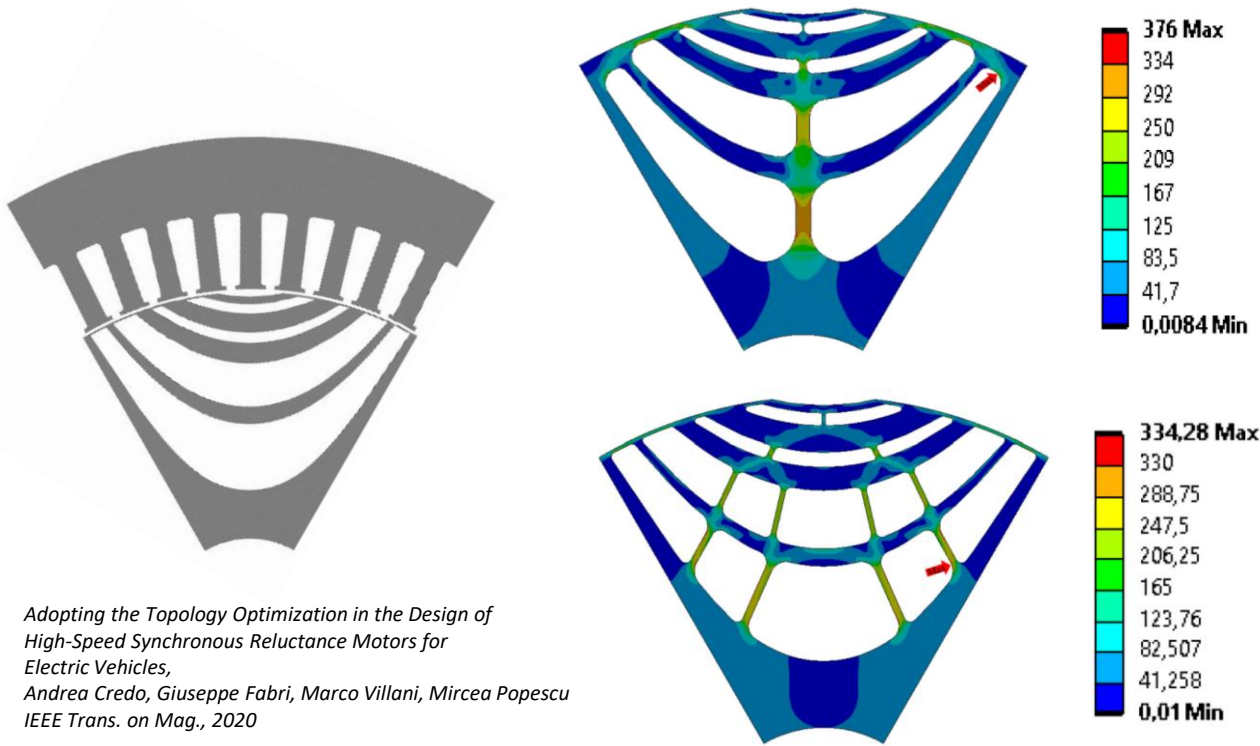


CONCLUSIONS

- Problématique *sous-jacente* de non-utilisation des **matériaux critiques**
 - Prise en compte dès les phases de choix et de conception des machines électriques
- Illustration au travers des travaux du projet ESSENCYELE
 - Suppression des aimants puissants de type « Terres rares »
 - Recours aux structures réluctantes des Machines Synchrones (MSR)
 - Evaluation de techniques d'amélioration des performances:
 - Assistance par aimants « non critiques » de type ferrites;
 - Utilisations locales de matériaux « Dual Phase » (*expérimental*)
 - Fonctionnement à vitesses de rotation élevées
 - Confrontation à la problématique de la tenue mécanique des rotors « à trous » (réluctants)
 - Nécessité de tenir compte des efforts mécaniques
 - Dans des structures complexes telles les rotors des MSR
 - Conception multiphysique de machines électriques

PERSPECTIVES?

- → Possibilité de conception par **Optimisation Topologique!**
 - Domaines Magnétiques & Mécaniques



Adopting the Topology Optimization in the Design of High-Speed Synchronous Reluctance Motors for Electric Vehicles,
Andrea Credo, Giuseppe Fabri, Marco Villani, Mircea Popescu
IEEE Trans. on Mag., 2020

Stéphane VIVIER

Maitre de conférences à l'Université de Technologie de Compiègne

stephane.vivier@utc.fr

roberval.utc.fr

utc.fr

Partie 1 – Pitch Projets

1) ECOSWING



2) JEOLIS



Par **A. Ammar**, ingénieur études électriques chez
JEUMONT Electric

JEOLIS

JEOLIS – Le Projet

➤ Objectif :

Développer une chaîne de conversion **optimale** et **originale** pour des applications éolien offshore jusqu'à 10 MW

Optimisation multicritère de la chaîne de conversion (choix de la tension de la machine, quantité d'aimants permanents...)

Génératrice synchrone à rotor bobiné avec système d'aimants permanents de compensation des fuites magnétiques

➤ Financement et partenaires :



Lauréat de l'AMI Grand Eolien

Labélisation MEDEE

Durée : 2012 à 2018



JEUMONT Electric



L2EP (Université de Lille 1)



Anciennement TEMPO
(Université de Valenciennes)



Ferme Eolienne du
Portel Plage

JEOLIS – La Machine

➤ Déroulement



Projet JEOLIS

Choix de la chaîne de conversion

AFE/AFE ou DFE/AFE
Une étoile ou Multi-étoiles

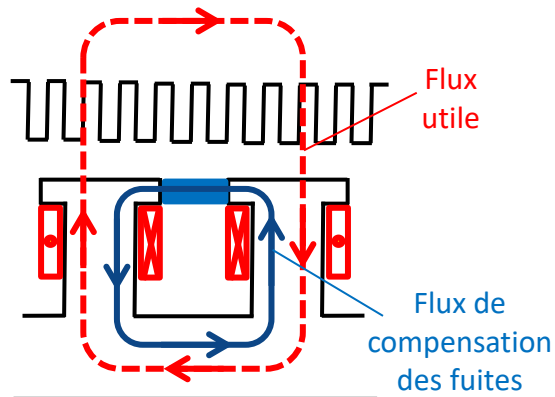
Essais sur maquette et banc

Validation de la conception
Maquettes thermique,
mécanique,..

Démonstrateur de 900 kW

Dimensionnement et fabrication
Mise en service et essais

➤ Particularités du rotor



Aimants de compensation

Noyaux polaires

Diminution de la saturation du pôle



Augmentation du flux utile



Augmentation du couple

JEOLIS – Les Résultats

➤ Difficultés rencontrées :

- Problèmes lors de la mise en service essentiellement dus à la vétusté du convertisseur existant :
Echauffement du rotor, bruits d'origine électromagnétique, contrôle non optimal
- Problèmes résolus après acquisition et intégration d'un convertisseur récent

➤ Performances énergétiques sur la durée des essais sur site :

- Avant changement du convertisseur, la production en énergie électrique était dans la moyenne de celle du parc malgré un taux d'indisponibilité inférieur
- Après changement du convertisseur et optimisation de la loi de commande la production a atteint 125% de la moyenne du parc

➤ Comparaison théorique par rapport aux technologies classiques :

	JEOLIS	Machine d'origine*	MSAP
Puissance (kW)	900	750	900
Diamètre extérieur (mm)	4000	5800	3900
Masse totale (T)	17	25.3	19
Masse aimants (kg)	84	-	350

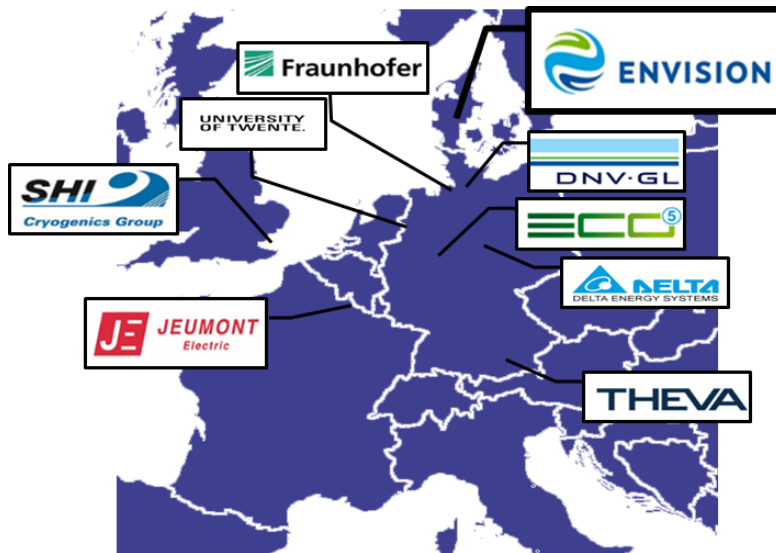
*Machine d'origine de type synchrone à rotor bobiné

ECOSWING

ECOSWING – Le Projet

➤ Objectifs :

- Concevoir et fabriquer un générateur supraconducteur de forte puissance et de très fort couple (3.6MW à 15t/mn) pour une éolienne ✓
- L'installer sur l'éolienne bipale (128m) à Thyborøn, Danemark ✓
- Démontrer que le système est compétitif



➤ Consortium :

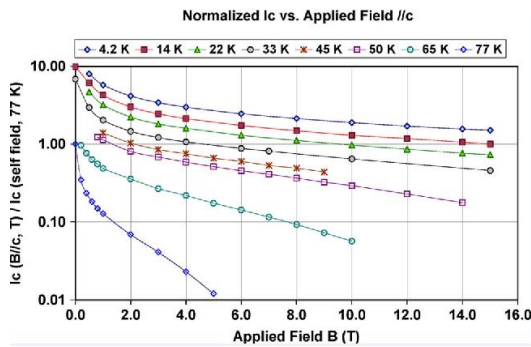
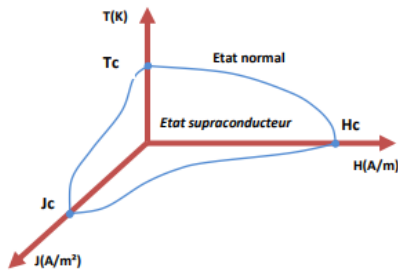
- 9 partenaires issus de 5 pays
- Projet H2020
- 2015 à 2019
- Coût : 13.8M€ (10,6 M€ financement EU)

<http://ecoswing.eu/>

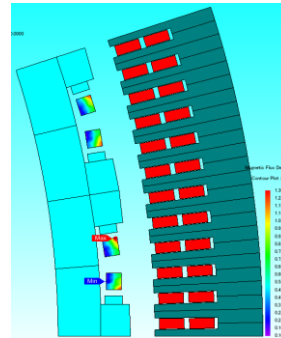
ECOSWING – La Modélisation

➤ Modélisation électromagnétique

- L'état supraconducteur du fil dépend de sa température, du champ magnétique et du courant le traversant. Sous certaines conditions la résistivité du fil est nulle.



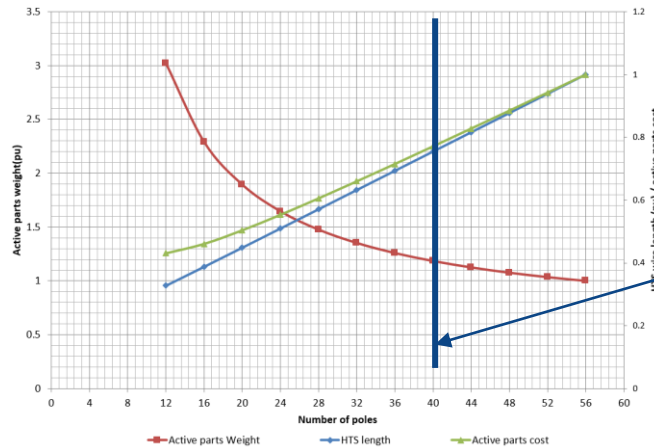
- 1- Extraction of Applied Field
- 2- HTS wire length calculation



$$J_c(B_{\parallel}, B_{\perp}) = \frac{J_{c0}}{\left(1 + \frac{\sqrt{k^2 B_{\parallel}^2 + B_{\perp}^2}}{B_0}\right)^{\beta}}$$

$$N_turns = A_{tr}/J_c$$

HTS wire length



40 poles is a good compromise

ECOSWING – La Machine

➤ Descriptif général :

TYPE:

- Synchrone, 40 pôles, 690V , 4 étoiles (4 convertisseurs)

STATOR:

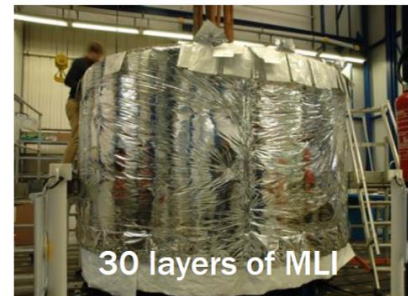
- conventionnel – refroidissement par air
- Bobinage imbriqué isolé en VPI

TECHNOLOGIE DU ROTOR:

- **25 kms** de fil supraconducteur **12 x 0.2 mm²**
- Densité de courant dans le fil **~ 100 A/mm²**
- Induction dans l'entrefer **1.6 Tesla**
- Refroidissement par conduction **~ 30 °K**
- 9 têtes froides quasi standards et neuf compresseurs
- Rotor dans un cryostat sous **vide secondaire**
- joint tournant **Hélium gazeux** pour l'alimentation des têtes froides
- **Système breveté** pour la **transmission du couple** depuis la partie froide du rotor vers l'arbre

ELECTRONIQUE:

- 4 convertisseurs MLI à IGBT
- Système de détection des quenchs embarqué au rotor

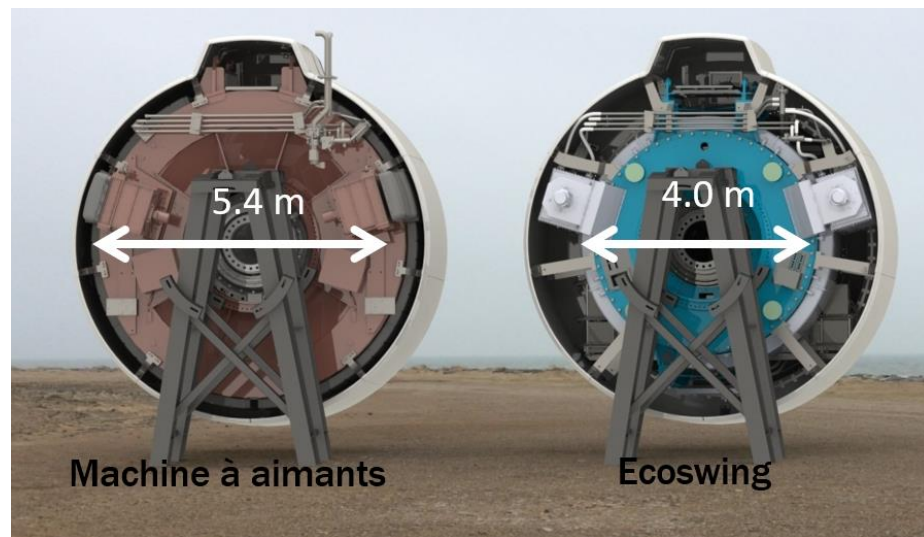


ECOSWING – Les Résultats

➤ Résultats et faits marquants :

Dans le cadre du projet, une machine de 3.6MW à 15tr/mn a été conçue, fabriquée et testée:

- Une usine de fabrication de fil supra a été construite (Theva) et a produit environ 25km de fil
- Les compresseurs de refroidissement sont 'sur étagère'
- La machine a été testée avec succès à IWES
- La machine a été installée sur l'éolienne et testée en conditions réelles
- La machine a fonctionné 6 mois et a fourni 3MW
- Défaut sur les convertisseurs IGBT et court circuit biphasé
- La machine a démontré sa robustesse (aucune avarie sur la machine lors des CC convertisseurs)
- Le joint tournant Hélium a démontré sa performance (pas de rechargement pendant tous les essais)



machine deux fois plus compacte qu'une MSAP



Par A. Ammar, ingénieur études électriques chez JEUMONT Electric

aymen.ammar@jeumontelectric.com

jeumontelectric.com

Partie 2 – Table-ronde : Dépasser la contrainte des matériaux critiques en génie électrique



avec **A. Tounzi**, Enseignant-chercheur à l'Université de Lille, laboratoire L2EP



UNIVERSITÉ D'ARTOIS

R. Romary, Enseignant-chercheur à l'Université d'Artois, laboratoire LSEE



S. Vivier, Maître de conférences à l'Université de Technologie de Compiègne, laboratoire Roberval

Animée par : S. Drouart, Responsable de projets R&D et Innovation au pôle MEDEE

C'est à vous : Posez vos questions !

Partie 3 – Economie circulaire des matériaux critiques



Par **M. Vouters**, coordinateur projets au pôle Team2

- TEAM2
- Le recyclage des métaux
- Les clefs du recyclage
- Retour d'expérience : la boucle d'économie circulaire du zinc en Hauts de France
- Recommandations



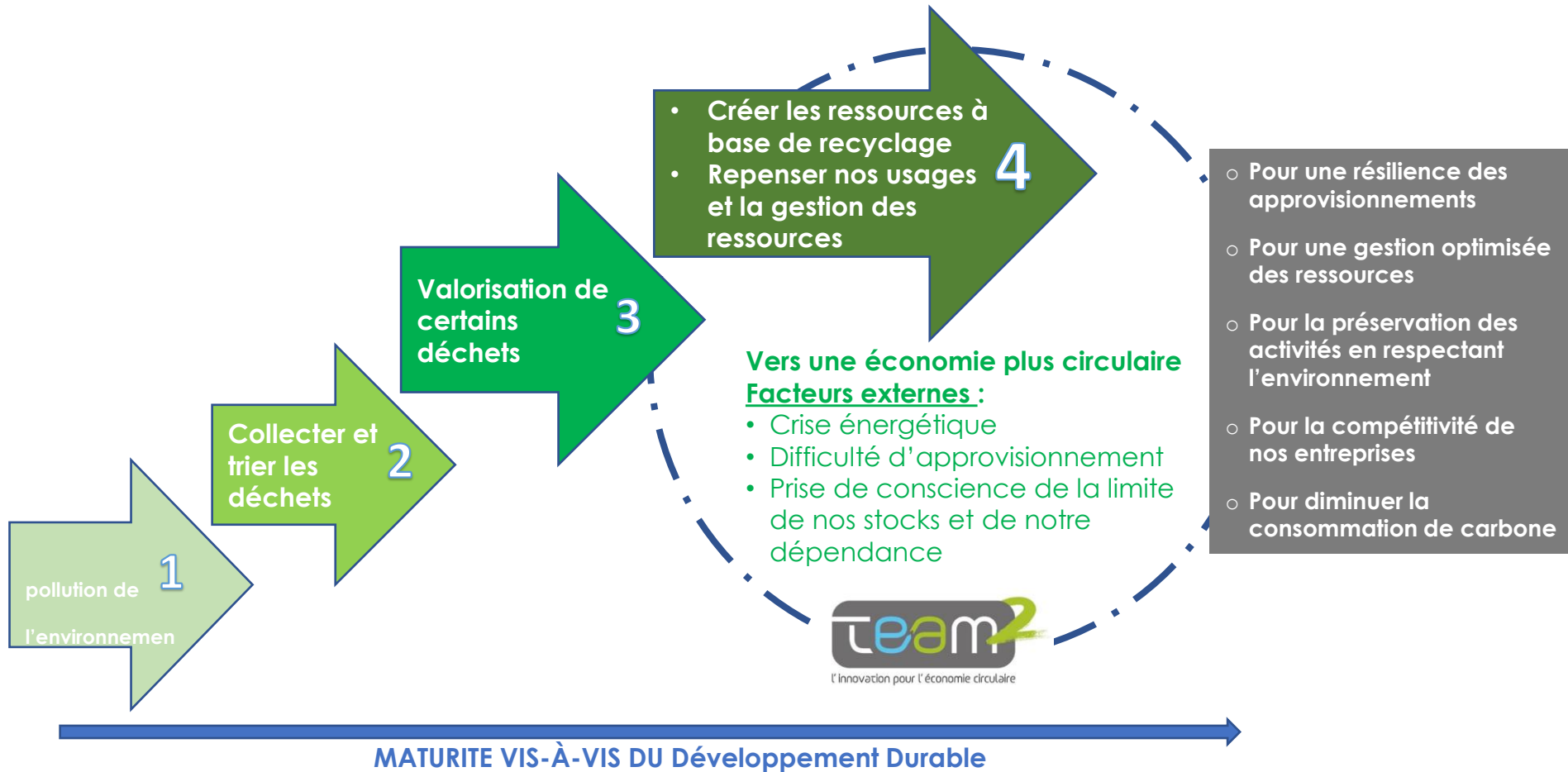
Pôle de compétitivité dédié à la transition vers une économie plus circulaire :

- ▶ Gestion optimisée des ressources : métaux, minéraux, organiques, équipements recyclage
- ▶ Modèles économiques et cohésion sociale
- ▶ Boucles innovantes d'économie circulaire.

Favorise le développement d'innovations par :

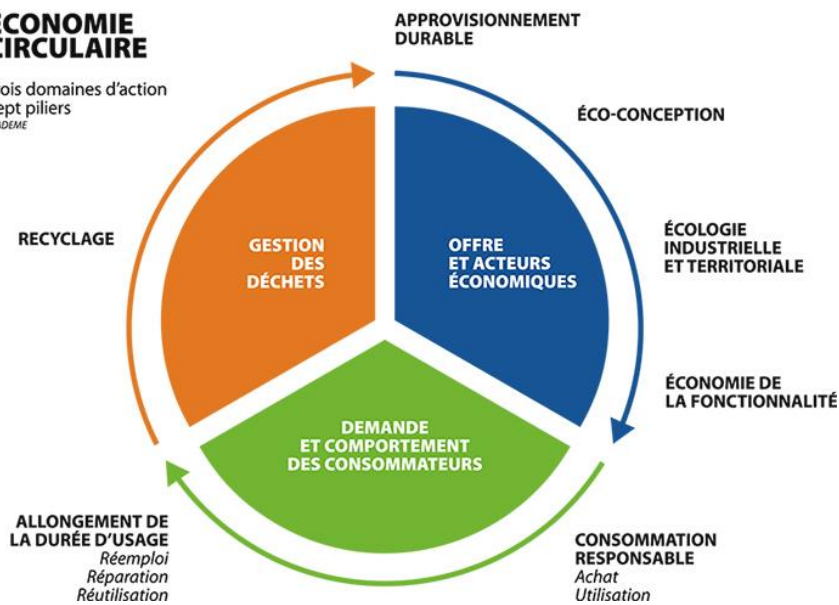
- la mise en réseau,
- la recherche de financements,
- l'accompagnement aux projets collaboratifs,
- la communication et la veille.





ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Trois domaines d'action
Sept piliers
©ADEME



La mine urbaine



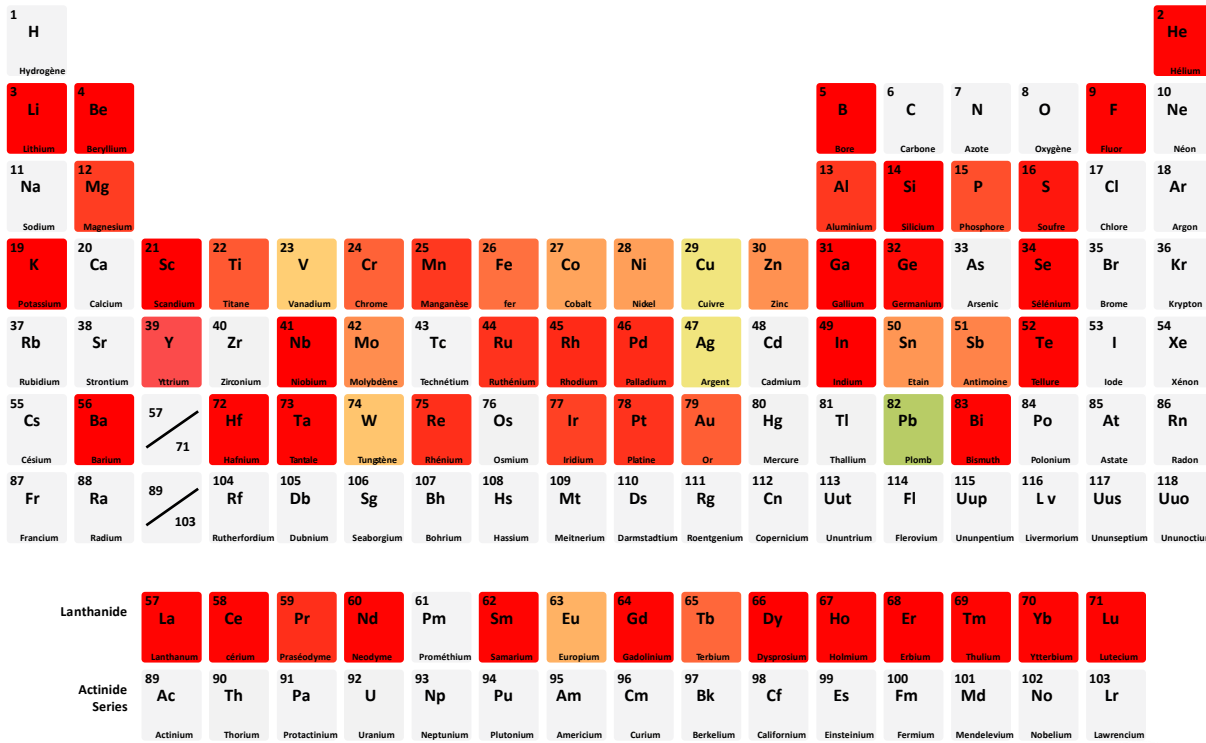
Le recyclage est une partie de la solution pour les approvisionnements des ressources du futur
mais...



Taux de recyclage (Union Européenne)



l'innovation pour l'économie circulaire



Exemple : SOLVAY

- Lancement d'une activité de recyclage de terres rares en 2011,
- Industrialisation des résultats du projet Coléop'terre (procédé innovant de recyclage des terres rares contenues dans les ampoules basse consommation)
- Contexte favorable en 2011 : resserrement des exportations chinoises laissait craindre des difficultés d'approvisionnement.
- Quatre ans après, les prix des terres rares ont retrouvé leurs niveaux d'avant-crise, et le procédé a reperdu sa compétitivité.
- Diminution des gisements au profil des ampoules LED....
- Arrêt en 2016 faute de rentabilité.



➔ Flux imprévisibles sur le long terme du fait des évolutions technologiques

➔ Besoin d'investissement en Recherche et développement importants pour recycler les sous-produits



Les clefs de la boucle



Connaître les gisements

- Quantité et qualité des produits, localisation
- Identification des gisements de métal collectable
- Massification



Procédé de valorisation des produits

- Investissement nécessaire : collecte, tri, stockage et traitement
- Facilité de récupération des métaux
- Avoir une technologie qui permet de récupérer les sous produits
- Performance de l'outil : taux de pureté, flexibilité, agilité sur d'autres sources, énergie utilisée
- Coût du recyclage vis-à-vis du marché, niveau de tension de l'offre au niveau mondial et perspectives d'évolution de la demande



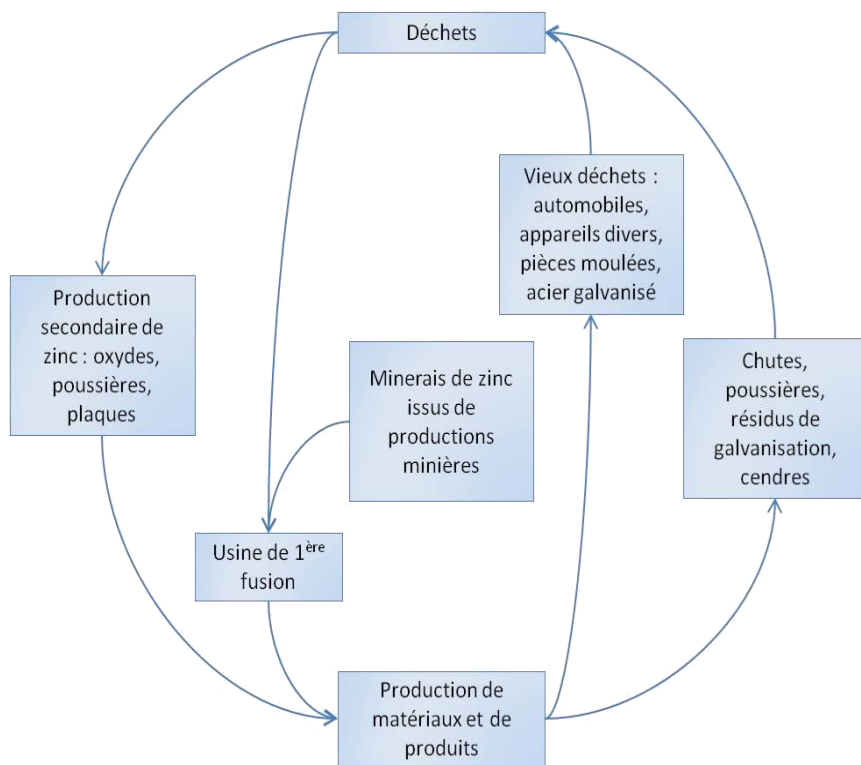
Faisabilité de la boucle

- Présence des acteurs intervenant dans le cycle de vie du métal
- Marché, exutoires, applications industrielles du métal



La boucle du Zinc en Hauts-de-France

Présent dans de nombreuses industries → nombreux déchets



1/3

De la production mondiale du zinc est issue de zinc recyclé

-75%

Energie nécessaire pour la production de zinc secondaire issu du recyclage

60%
du Zinc recyclable est recyclé

CO₂ : -95%

Le zinc secondaire issu du recyclage émet 22 fois moins de CO₂

100 ans

L'intervalle de temps entre la production et le recyclage des produits en zinc



Zinc = Métal stratégique ?

NON

- Pas repris dans les listes officielles des Métaux stratégiques (UE, COMES...)
- Ressources en baisse mais conséquentes
- Peu de tensions géopolitiques

OUI

- Forte demande de certains pays (Chine consomme plus de 60% de la production mondiale)
- Essentiel pour protéger l'acier et les infrastructures
- Vecteur de Métaux Stratégiques : In, Ge...



Stratégique pour un territoire : tous les acteurs de la boucle d'économie circulaire du zinc se retrouvent dans les Hauts-de-France



La boucle du Zinc en Hauts-de-France

Zinc = Métal stratégique pour un territoire

Production de zinc raffiné & valorisation des sous produits
Notamment métaux stratégiques
Nyrstar (59)



Lavage de concentré de zinc (Oxydes WAELZ)
Befesa Zinc Gravelines (59)



Galvanisation:
Arcelor Mittal (59)
Autres



Production automobile:
Renault - Douai (59)
Toyota - Valenciennes (59)



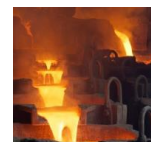
Collecte et tri ferrailles:
multi sites

Aciérie électrique:
LME (59)
Ascoval (59)



Acier

Industries métallurgiques et chimiques générant des déchets zincifères:
Befesa VALERA (59)
EJ Picardie (60)
SNCZ (59)



Valorisation des déchets zincifères & production d'un concentré de zinc
Recytech - (62)



Pourquoi la boucle fonctionne et est pérenne



- Une filière bien établie peut créer des innovations dans les métaux stratégiques et projets communs – **Travail en Cluster**
- Chaque acteur de la boucle développe des projets innovants spécifiques mais aussi en interaction
- Une boucle solide et des partenariats entre les acteurs sert de base à des innovations créant des boucles dans la boucle



- Aspects énergétiques : électricité, CO2
- Impacts réglementaires : parfois un frein à l'innovation
- Ressources humaines : attractivité, formation
- Image et reconnaissance : acteur de la nouvelle métallurgie au sein de l'économie circulaire d'un territoire (ACV)
- Transformation digitale
- Soutien financier à des projets innovants sans ROI immédiats



Retour d'expérience / Conclusion

- ▶ **Considérer toutes les étapes de la boucle d'économie circulaire**
- ▶ **Anticipation des technologies**
 - Place de l'écoconception
 - Consommation raisonnée
- ▶ **Mobilisation pour capter les gisements**
 - Réglementation ? (Séparation ? % de produits recyclés à utiliser)
 - Nouveaux modèles basés sur l'usage
 - Stockage de produits à recycler à long terme
- ▶ **Connaissances des procédés / natures de produits**
- ▶ **Soutien financier à des projets innovants sans ROI immédiats**
(garantit une certaine indépendance vis-à-vis des approvisionnements)
- ▶ **Mise en place d'une chaîne de valeur robuste :**
 - Gisement / traçabilité / exutoire
 - Réglementation à mettre en place
 - Investissement important / fluctuation des cours
 - Faciliter l'accès des PMES aux métaux stratégiques





Moise VOUTERS

Directeur adjoint du pôle Team2

m.vouters@team2.fr

team2.fr

C'est à vous : Posez vos questions !

Merci !

Sébastien Drouart

**Responsable de projets R&D et
Innovation au pôle MEDEE**

sdrouart@pole-medee.com

Laura Burgaud

**Chargée de mission au pôle
MEDEE**

lburgaud@pole-medee.com

pole-medee.com

