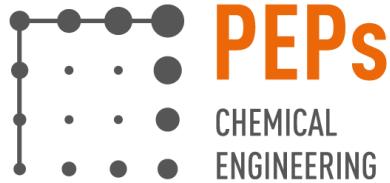


Pulsatec workshop: Liège

*Analyse des cycles de vie et
analyse technico-économique*

Antoine Merlo

20/10/2021



Fonds européen de développement régional | Europäischer Fonds für regionale Entwicklung



Structure de la présentation

- Introduction
- Evaluation économique et environnementale
- Utilisation et cas d'étude:
 - Identification des aspects problématiques
 - Prise de décision
 - Optimisation/paramétrisation
- Perspectives et conclusions

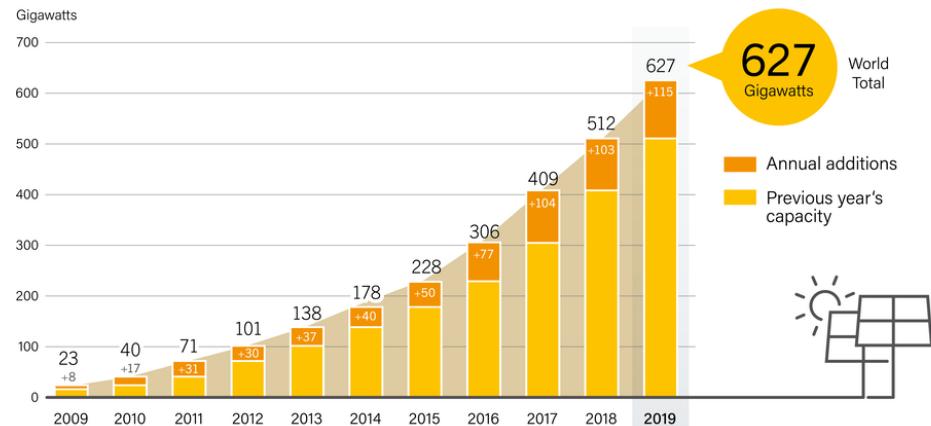
Introduction

- Utilisation de revêtements en hausse

... et besoin de transparence environnementale!



Solar PV Global Capacity and Annual Additions, 2009-2019



Note: Data are provided in direct current (DC).
Totals may not add up due to rounding.

1

Source: Becquerel Institute and IEA PVPS.

REN21 RENEWABLES 2020 GLOBAL STATUS REPORT

→ Application de techniques d'évaluations sur les technologies de déposition

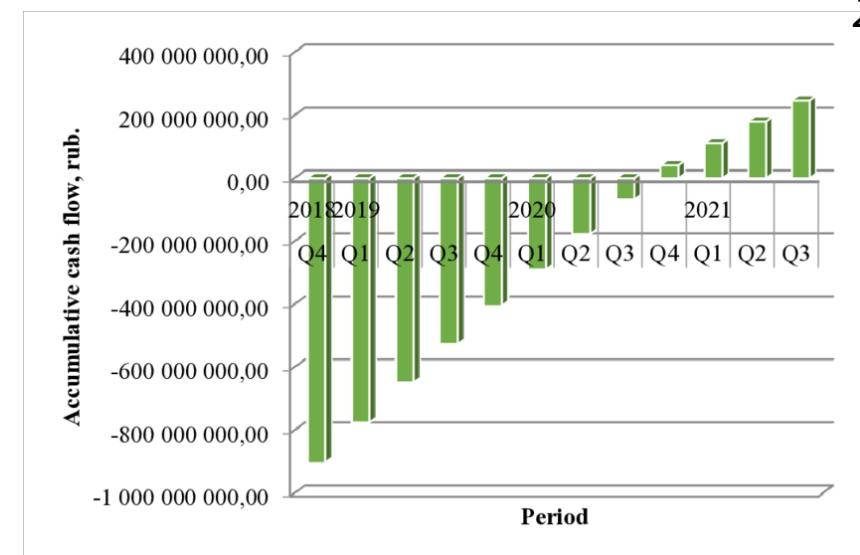
- Evaluation économique et environnementale jointe

Evaluation économique et environnementale

Evaluation économique

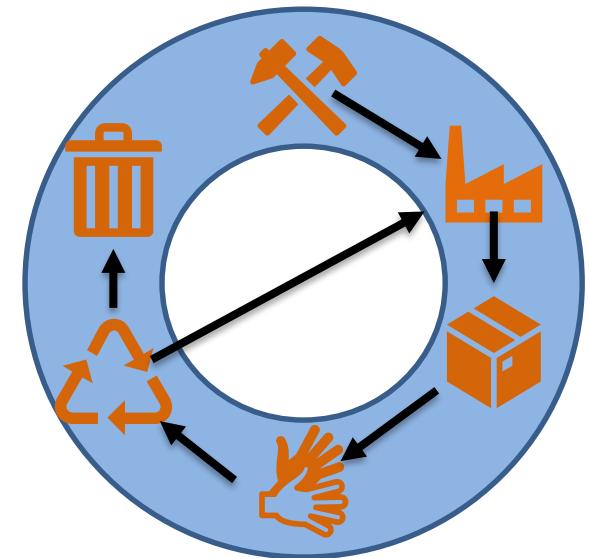
- Beaucoup de techniques pour l'évaluation économique:
 - Analyse techno-économique(TEA), Coût du cycle de vie(LCC), Net-Present Value (NPV), Cash Flow Analysis (CFA) ...
- Utilisation pour industriels ou propriétaires:

*Profitabilité
Planning*



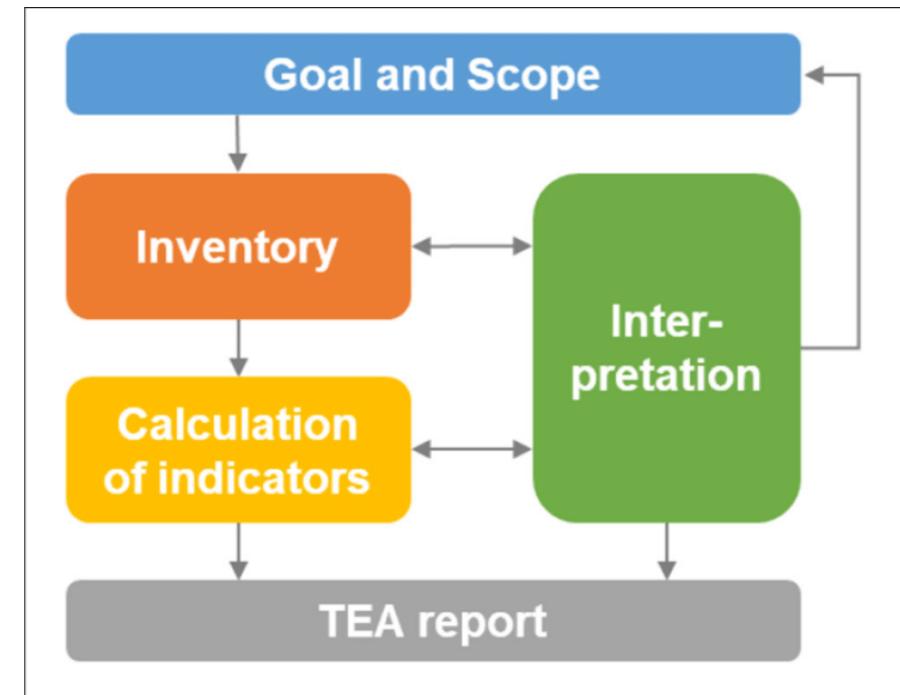
Evaluation environnementale

- Tout autant de techniques pour l'évaluation environnementale:
 - Analyse de cycle de vie(LCA), Material Flow analysis(MFA), Etude d'impact(EIA), Empreinte carbone ...
- Pour industriels/propriétaires:
 - Ecolabel
 - Conformité aux normes
 - Evaluation de futurs dommages (taxe CO2...)
 - EPD



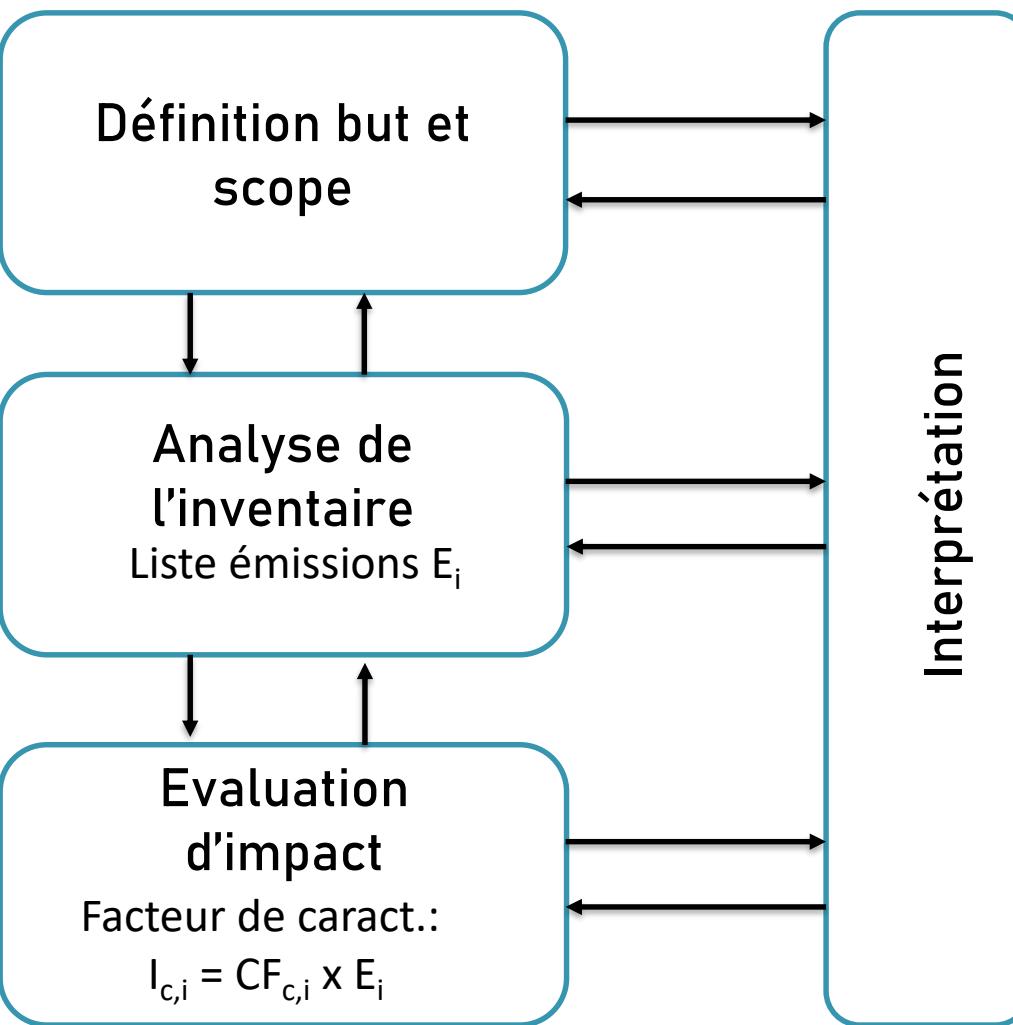
Analyse technico-économique(TEA)

- Evaluation et aggrégation des dépenses capitales (CAPEX) et opérationnelles (OPEX)
- Unique coût par unité fonctionnelle (U.F.)



→ Utile pour comparer des technologies en compétition

Analyse de cycle de vie(LCA)

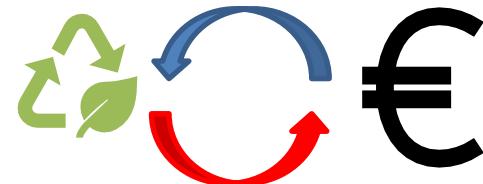


- Listage des émissions
 - Cycle de vie
 - Assignation de CF aux émissions dans \neq catégories d'impact
- ➔ Obtention d'impacts par UF

Pourquoi étude jointe LCA et TEA?

- Evaluation jointe → Approche multicritère nuancée

- Compromis



- LCA : complète prise en compte d'aspects du procédé
- TEA : indicateur unique utile ($\text{€}/\text{FU}$)

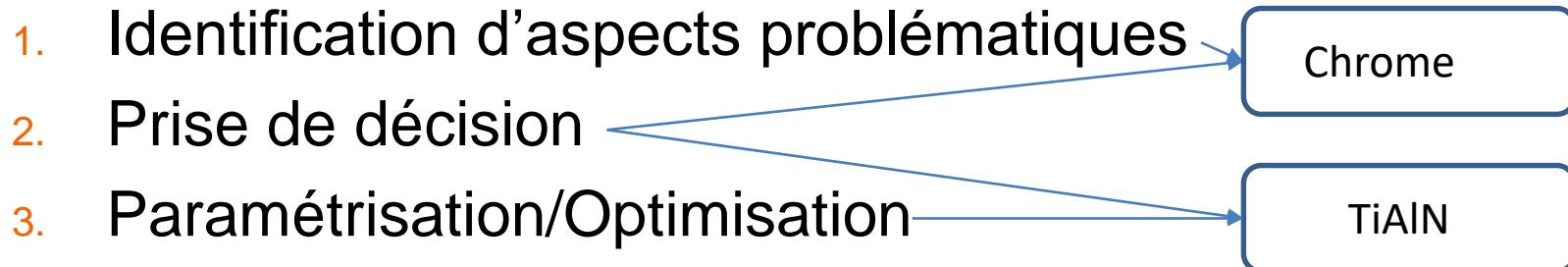
→ Symbiose entre les deux méthodologies: inventaire commun, UF, limite et but, ...

Application pour TEA-LCA jointe

- Démonstration de 3 différentes applications pour TEA-LCA jointe:
 1. Identification d'aspects problématiques
 2. Prise de décision
 3. Paramétrisation/Optimisation

Application pour TEA-LCA jointe

- Démonstration de 3 différentes applications pour TEA-LCA jointe:



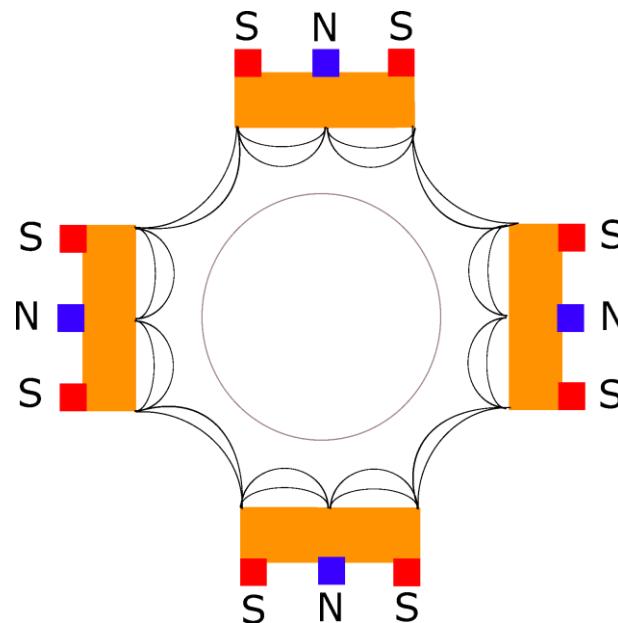
- Deux cas d'étude:
 - Remplacement du chrome en électrodepositio
 - HiPIMS pour revêtements de TiAlN sur outils de découpe

Application et cas d'étude

1. Chrome:
*Identification d'aspects
problématiques*

Chrome dur

- Comparer impacts de film de chrome de 20µm sur cylindre de 80 cm X Ø 40 cm => Unité fonctionnelle(UF)



- Deux technologies:
Pulvérisation magnétron
(MS-DC) et
électrodéposition (ED)

Différences entre les procédés

- Environnementalement:
 - Presqu'aucune émission pour MS-DC 
 - Plus grande consommation d'électricité 
 - Différent chemin de production pour métal et oxyde  (+-...)
- Economiquement:
 - Investissement + coûteux pour MS-DC 
 - Plus basse productivité (17µm/h vs 25µm/h) 
 - Moins de main-d'œuvre pour pré- et post-traitement (15 min vs 30 min) 

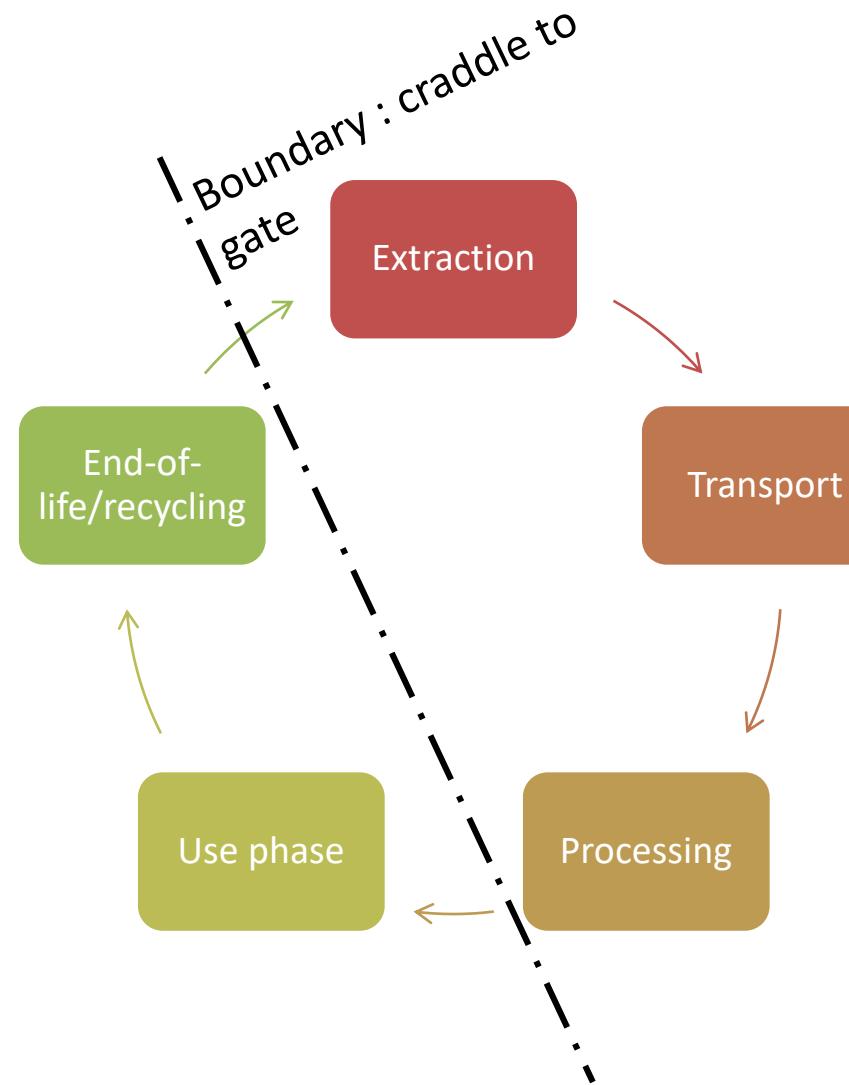
Méthodologie

- LCA pour impacts des 2 procédés
- Utilisation de l'inventaire obtenu pour TEA
- Simapro v9 utilisé
 - Base de données EcoInvent
 - Methode ReCiPe 2016 (Hierarchist configuration)



Champ de l'étude

- Scope: du berceau au revêtement
- Pas pris en compte:
 - Production du cylindre (substrat)
 - Transport
 - Equipement
 - Phase d'utilisation
- Mix électrique belge



Inventaire : électrodéposition

- Extrapolé et adapté de la littérature

<u>Coating</u>				<u>Wastewater treatment</u>			
Flow	Amount	Unit	Source	Flow	Amount	Unit	Source
Electricity	20.2	kWh	Present work	NaOH	26	g	(Rodriguez, et al., 2018)
Chromium oxide	298.5	g	Present work	SO ₂	18	g	(Rodriguez, et al., 2018)
Sulfuric acid	0.17	g	(Krishnan et al., 2008)	Sulfuric Acid	54	g	(Rodriguez, et al., 2018)
Water	332	L	(Rodriguez, et al., 2018)	MgO	29	g	(Rodriguez, et al., 2018)
Airborne Cr ^{VI} emissions	25.1	mg	(US EPA, 1996)	Water	19	L	(Rodriguez, et al., 2018)
Waterborne Cr ^{VI} emissions	54.5	mg	(Rodriguez, et al., 2018)				
Lubricating oil	28	g	(Rodriguez, et al., 2018)				

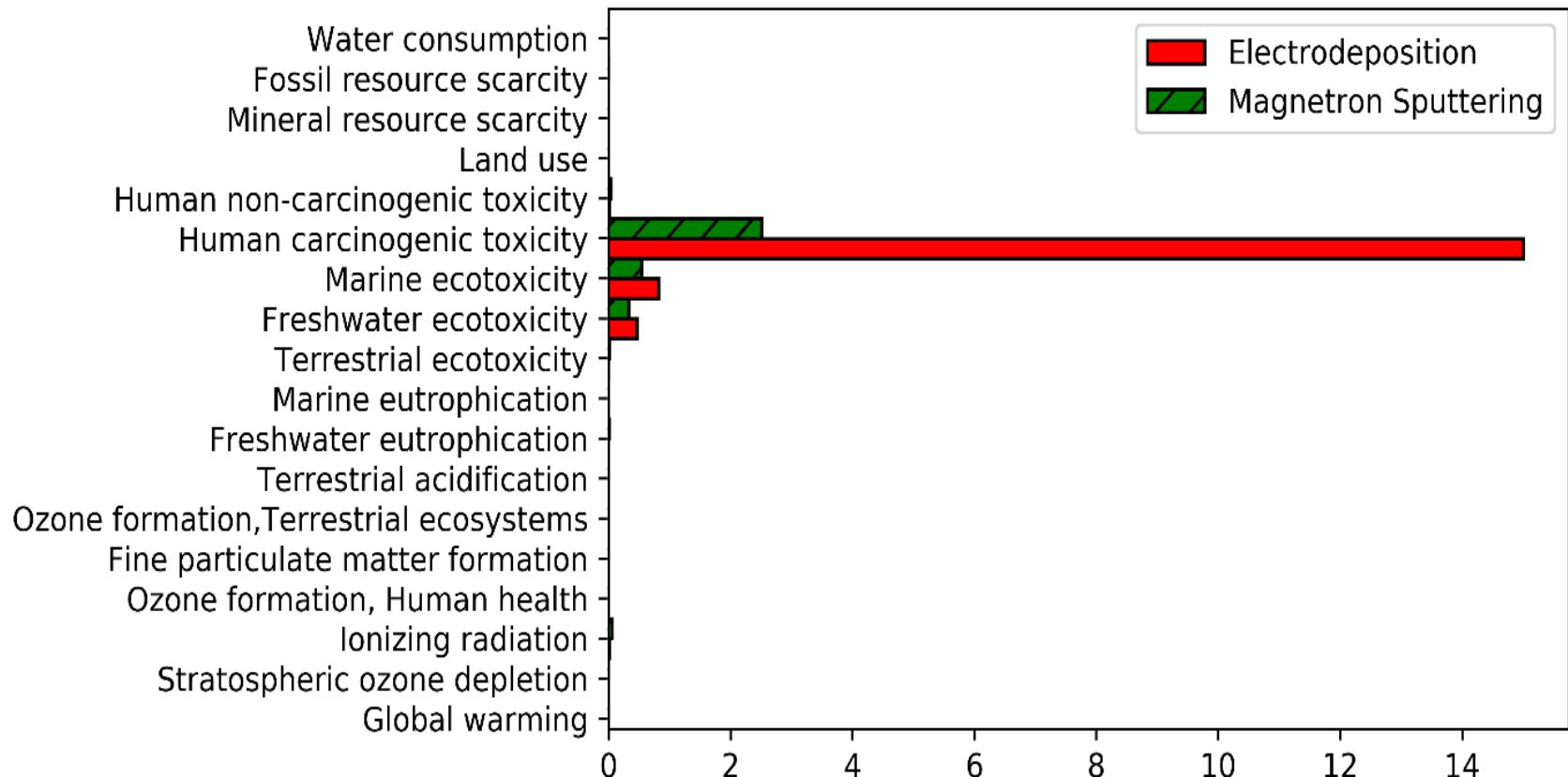
Inventory : DC-MS

- Extrapolé et adapté de la littérature

Coating

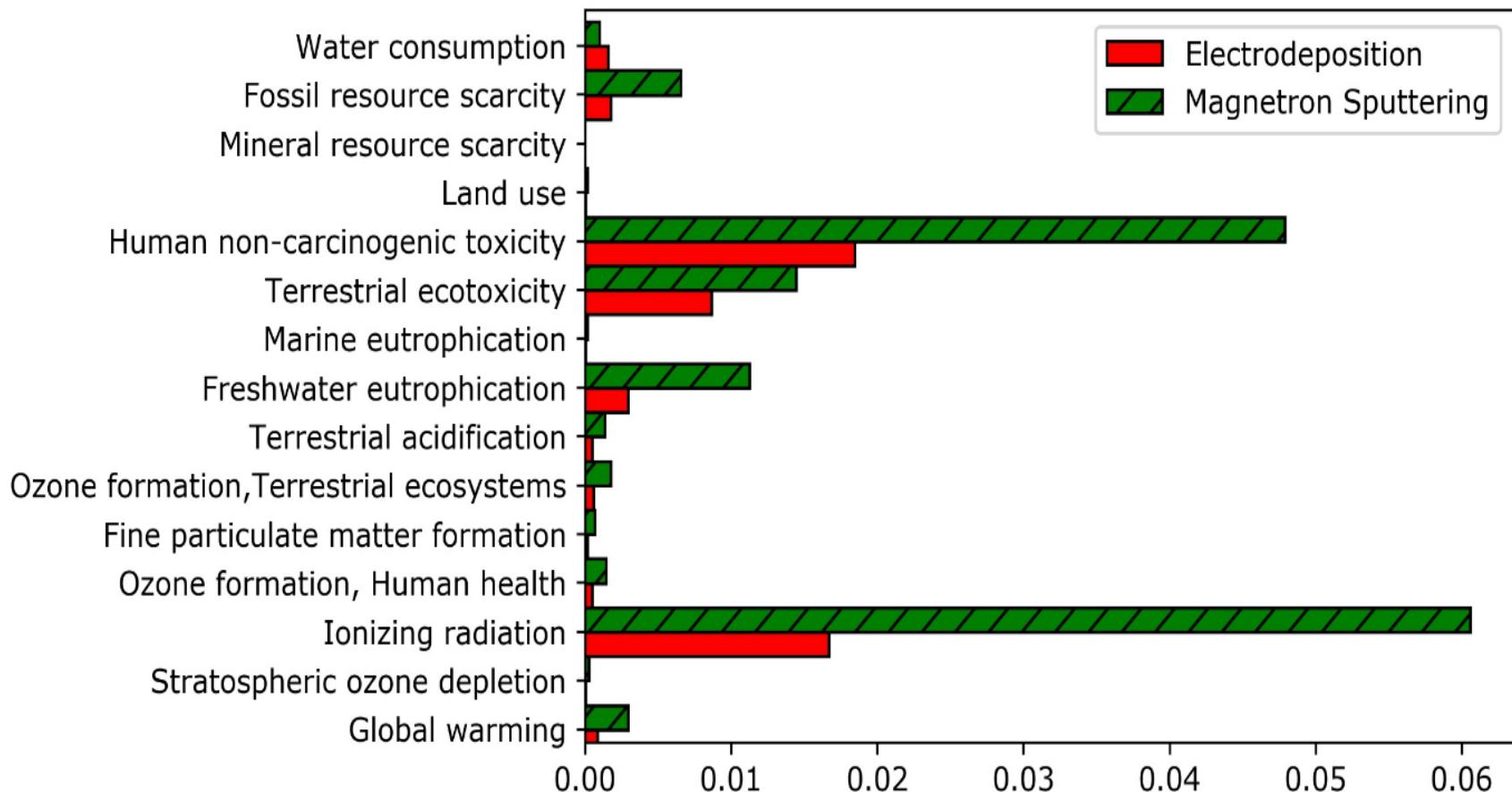
<u>Inputs</u>	<u>Amount</u>	<u>Unit</u>
Argon	25.12	g
Tap water	8	kg
Isopropanol	0.2	kg
Chromium	0.1685	kg
Electricity mix, BE	71.76	kWh
<u>Outputs</u>		
Argon (to air)	25.12	g
Chromium (to soil)	25.5	g
Water to sewer	8	kg

Impacts normalisés



- Facteur de normalisation: émissions moyenne pour une personne en 2010 → Détection de catégories hors normes

Impacts normalisés– sans tox.



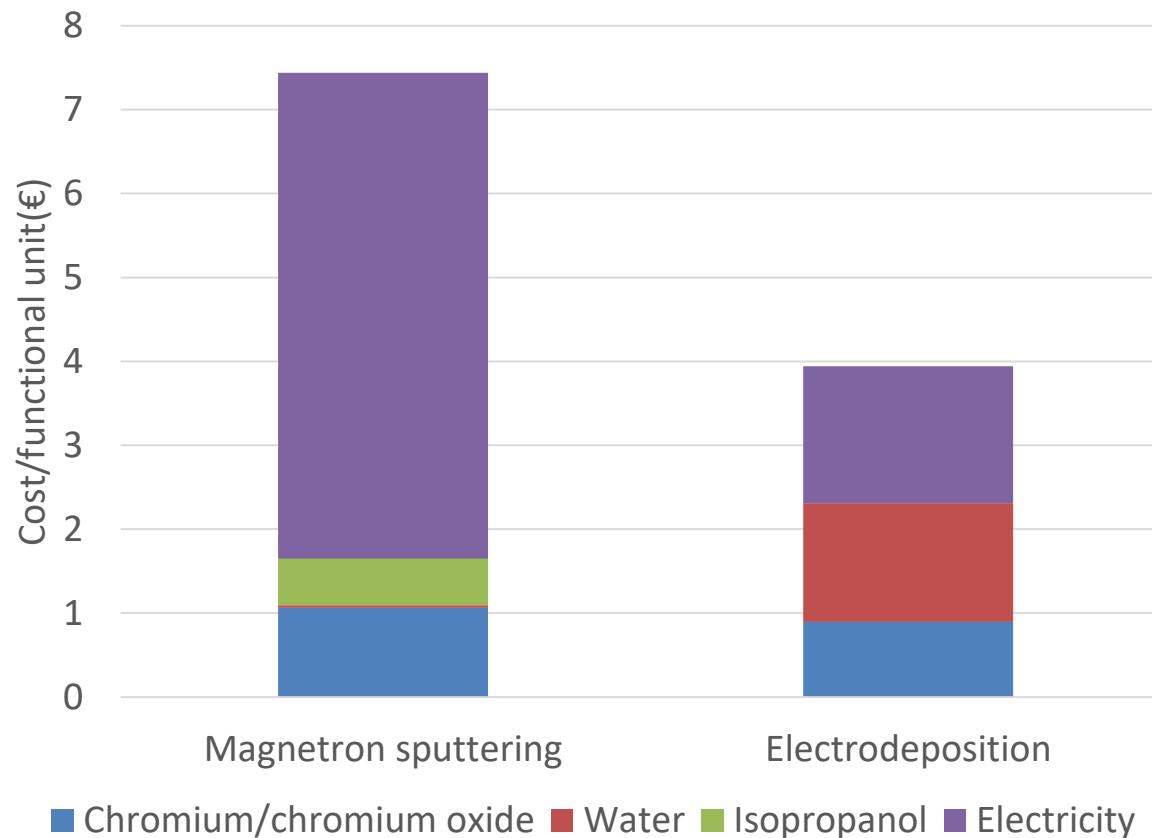
Résultats

- Toxicités le plus problématique
 - Cr^{VI} extrêmement carcinogénique
→ haut impact normalisé
 - Autres impacts corrélés avec la consommation d'électricité
- Deux problèmes principaux: émissions de Cr^{VI} et consommation d'électricité



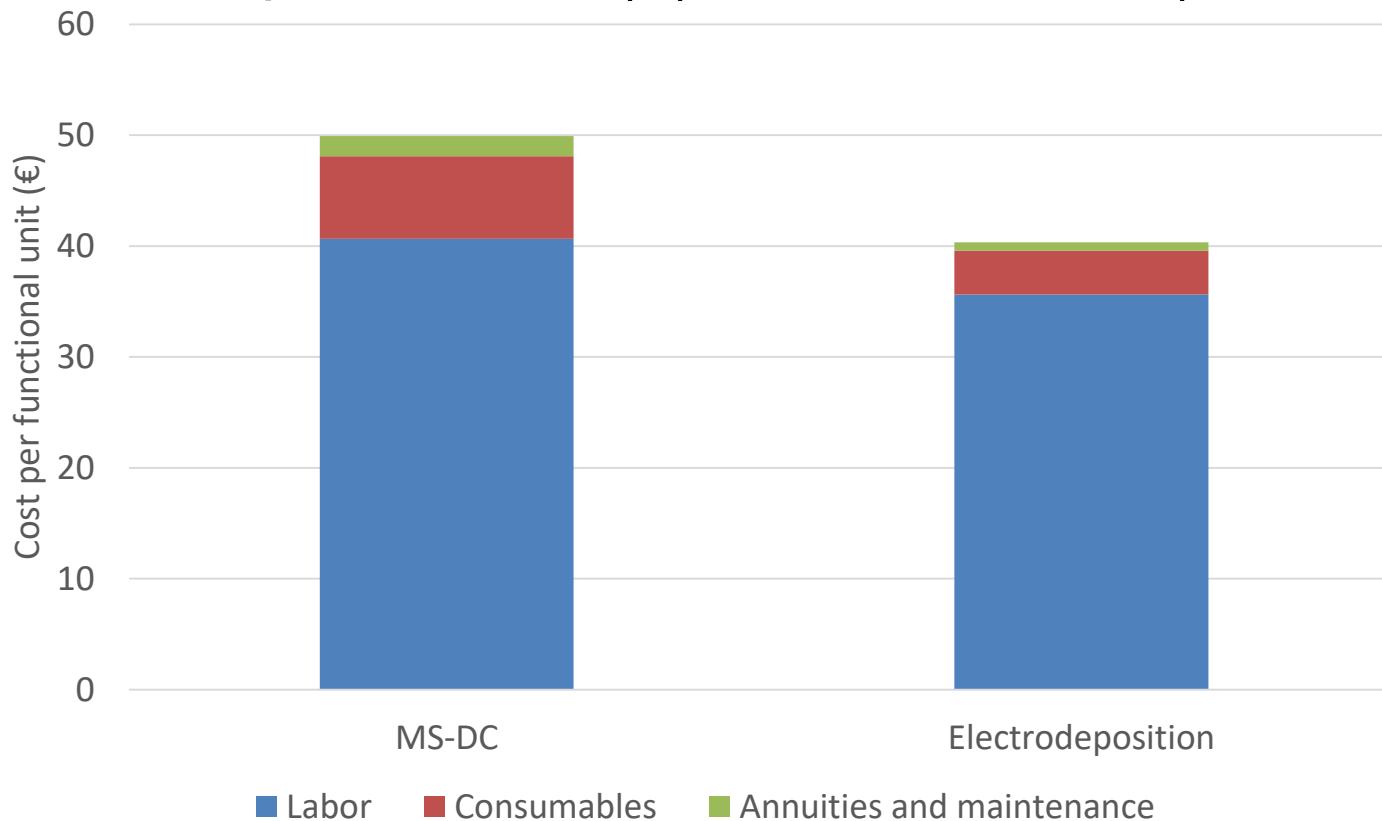
Estimation des coûts

Coûts des consommables plus important pour
MS-DC (7.46€ vs 3.96€)



Estimation des coûts

Cependant main-d'œuvre le plus important (en Europe de l'ouest) (49.91€ vs 40.35€)



Application et cas d'étude

2. Chrome:
Prise de décision

Une alternative viable?

- Probablement pas 😞
 - Sauf si conditions spécifiques:
 - Haut degré d'automation
 - Faible impact du mix énergétique
 - Techno pas utilisée pour réparer revêtements ou substrats
- Intéressant pour revêtements plus fins, décoratifs!
- HVOF plus prometteur comme alternative, p.e.

Application et cas d'étude

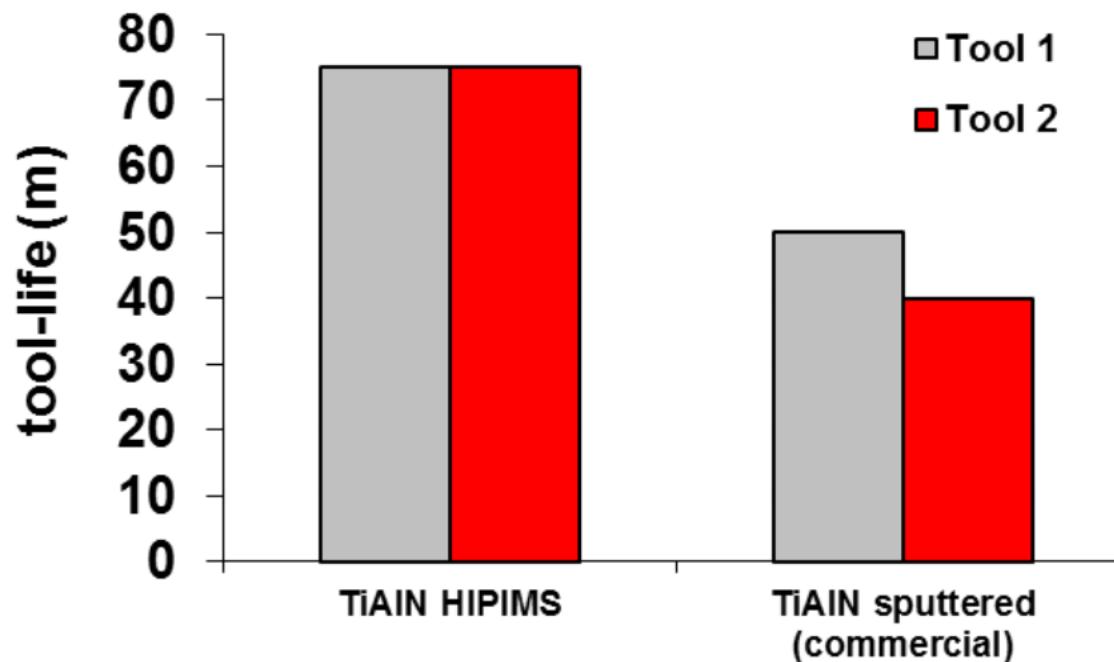
3. TiAlN:
Optimisation/Paramétrisation

But: TiAlN pour outils de découpe

- HiPIMS: plus coûteux, mais meilleure performance pour outils de découpe que MS-DC
- Extension du champ:
 - Phase de dépôt →
 - Phase de découpe
- Plus long temps de vie → Moins d'interruptions → Plus de productivité, moins d'outils consommés
- Evaluation économique et environnementale jointe

TiAIN et l'HiPIMS

- Meilleures performances → Meilleure durée de vie
- Compense les coûts de l'HiPIMS?



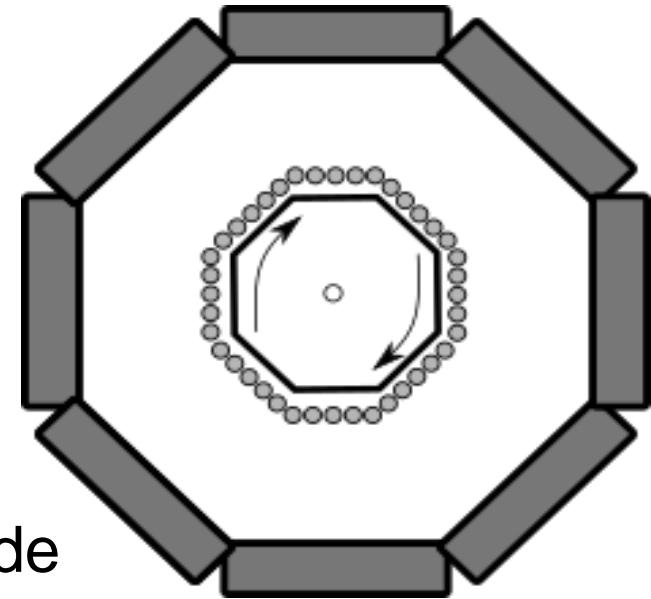
Outils

- Outils HSS: 8mm diamètre, 8 cm longueur
- 4µm TiAlN
- Temps de vie: 75 min pour HiPIMS et 50 min pour MS-DC
- 1.8µm/h for HiPIMS
3.6µm/h for DC-MS



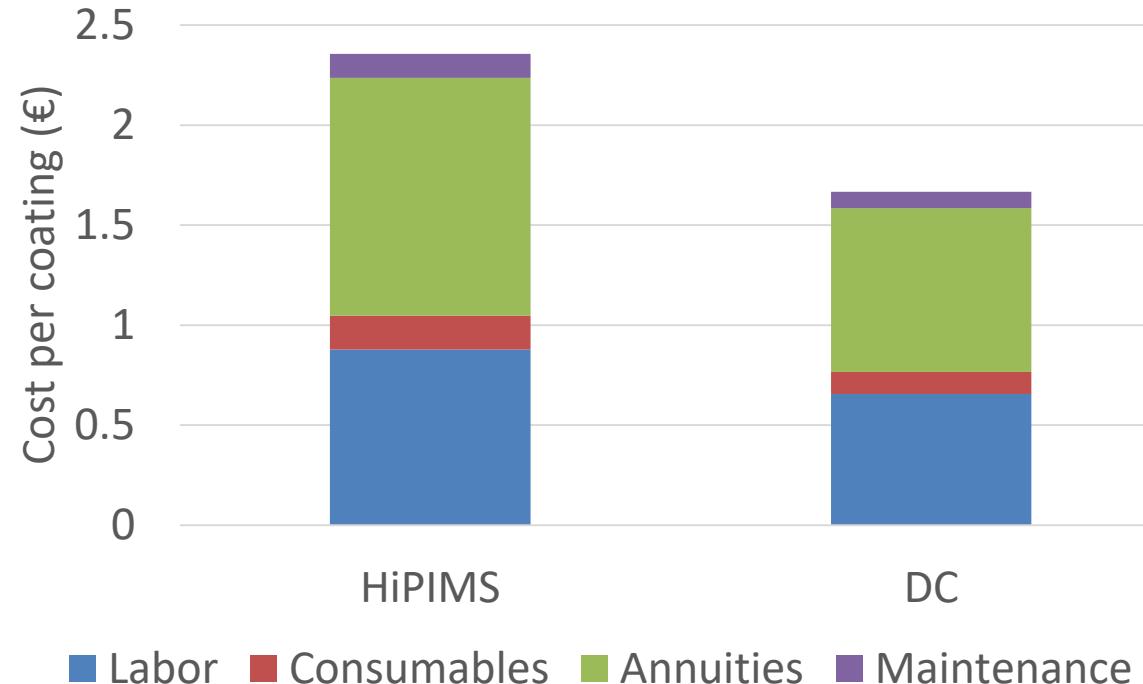
Installations

- 200 outils par batch
- Substrats chauffants et tournants
- HiPIMS : 1 300 000 €
DC-MS : 1 200 000 €
- Même consommation mais temps de déposition plus long pour HiPIMS (133 min vs 67 min)



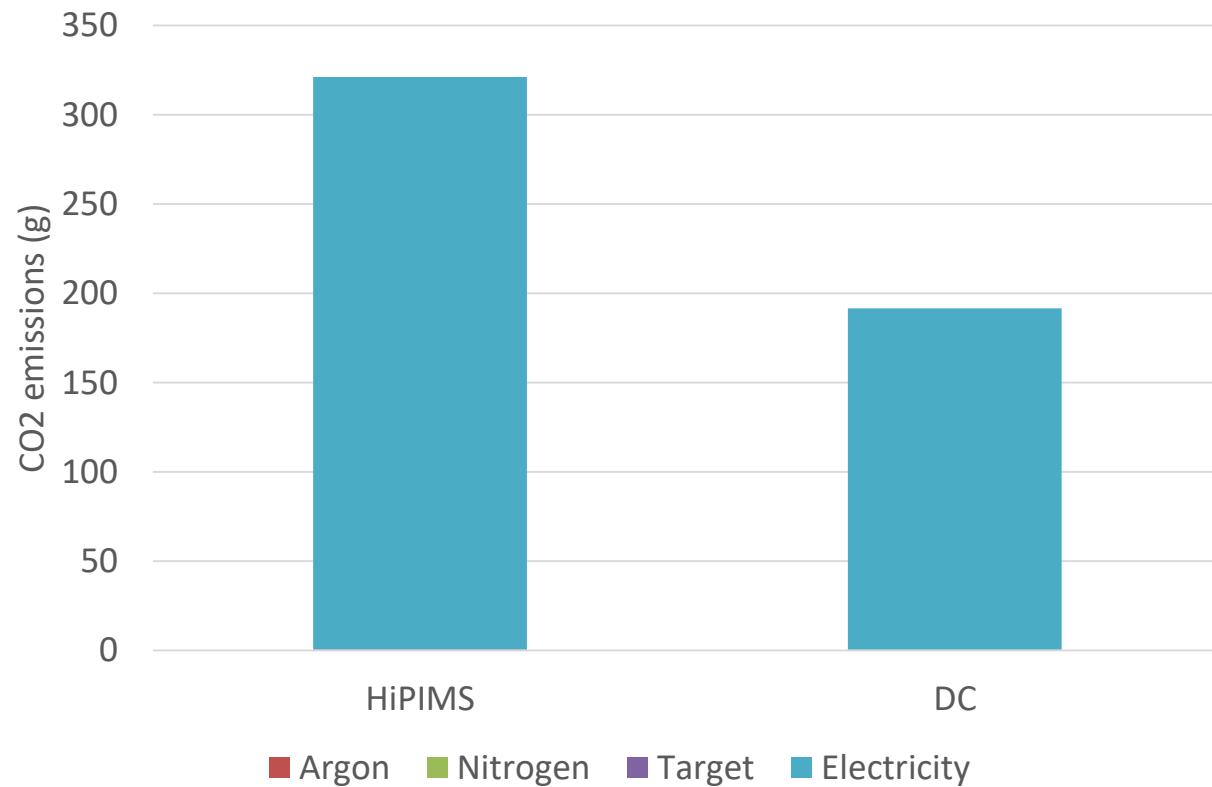
Evaluation des coûts (revêtements)

- Deux shifts (8h) par jour (40€ pour l'opérateur)
- 1464 vs 1094 batchs par an (MS-DC vs HiPIMS)
- 0.08€/kWh
- Payback sur 5 ans



Impact environnemental (revêtements)

- Emissions de CO₂: 320.7 gCO₂ for HiPIMS, 191.2 gCO₂ for MS-DC
- Electricité facteur principal (Belgian EF: 174 gCO₂/kWh)



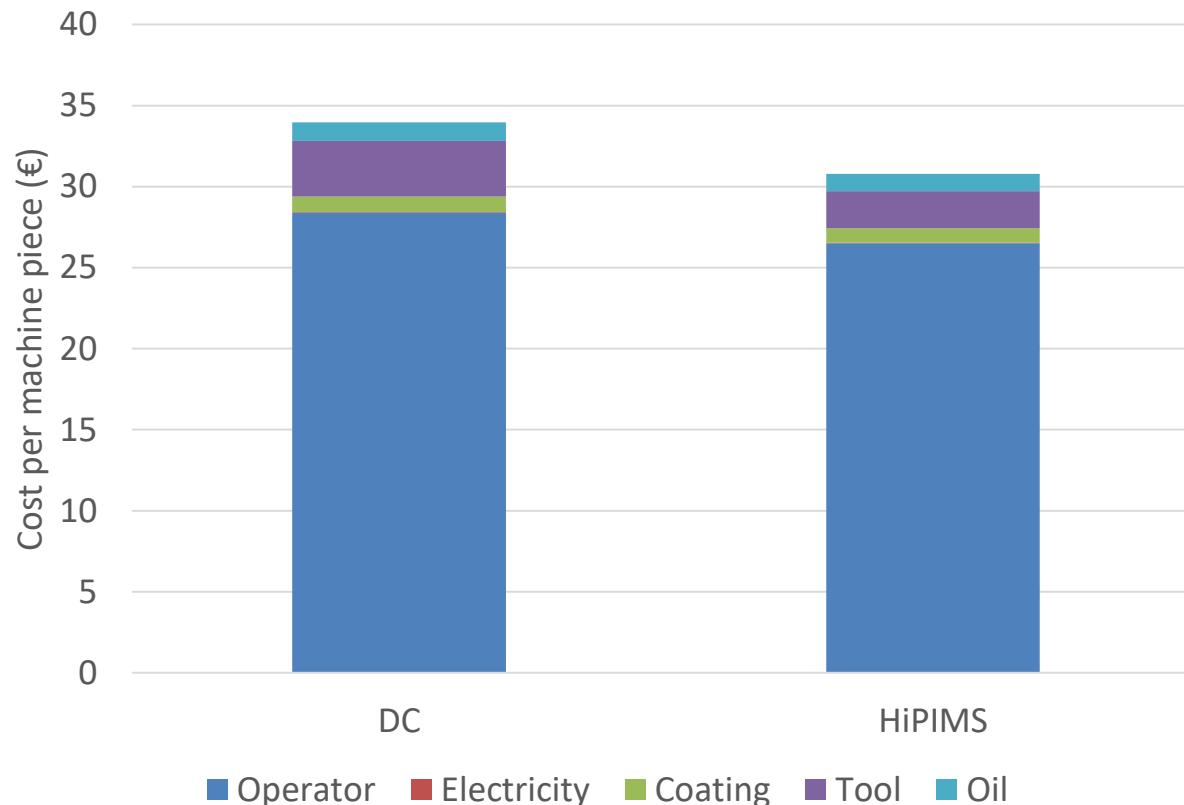
Phase de découpe

- Inclusion des coûts et impacts de la phase de découpe:
 - Substrats
 - Revêtements
 - Fluide de découpe
 - Electricité consommée
- Le temps de vie aura un impact sur ces facteurs!



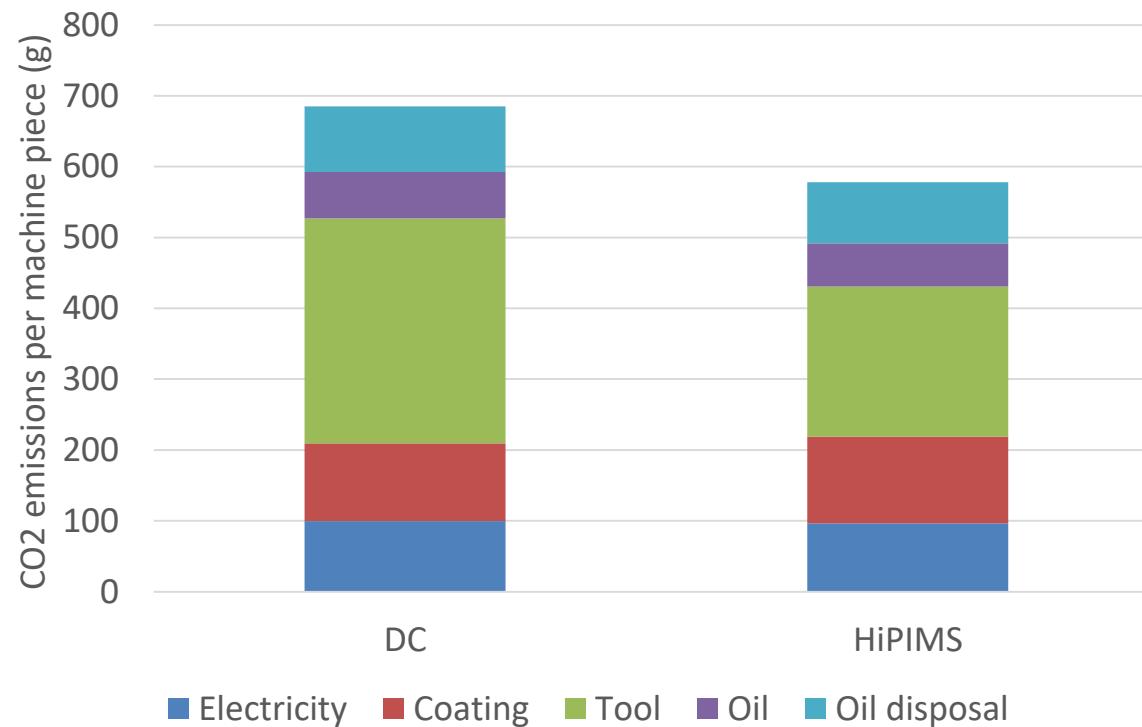
Coûts (phase de découpe)

- Moins de temps d'arrêt → Plus faible coûts et plus grande productivité



Impacts (phase d'utilisation)

- Plus d'émissions de CO₂ pour l'HiPIMS, mais:
 - Moins de substrats
 - Moins de fluide de découpe
 - Moins d'électricité utilisée passivement



Conclusions

- HiPIMS réduirait les coûts de 10% et les émissions de CO2 par 15%
- Haut potentiel pour HiPIMS
- Différentes conditions ?
 - Conditions de lubrification
 - Vitesse de découpe



Paramétrisation: équation de Taylor

- Paramétrisation du coût et du CO2 (2 objectifs)
- $VT^n = C \rightarrow$ Vitesse de découpe comme paramètre

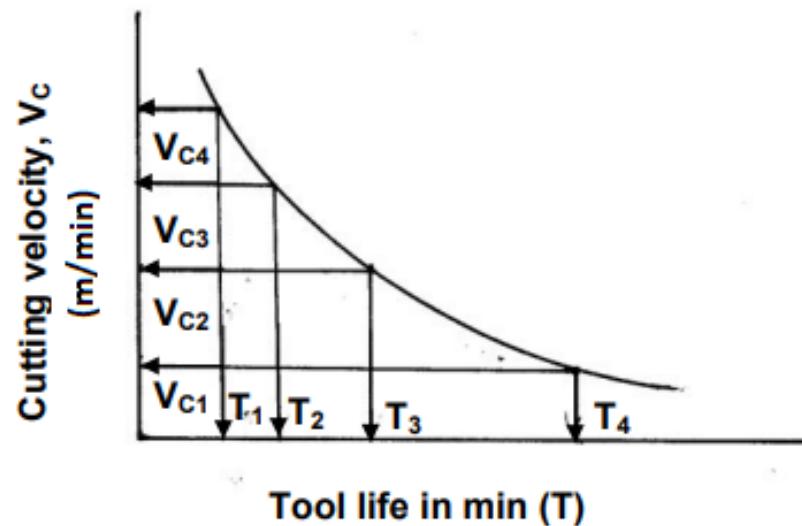
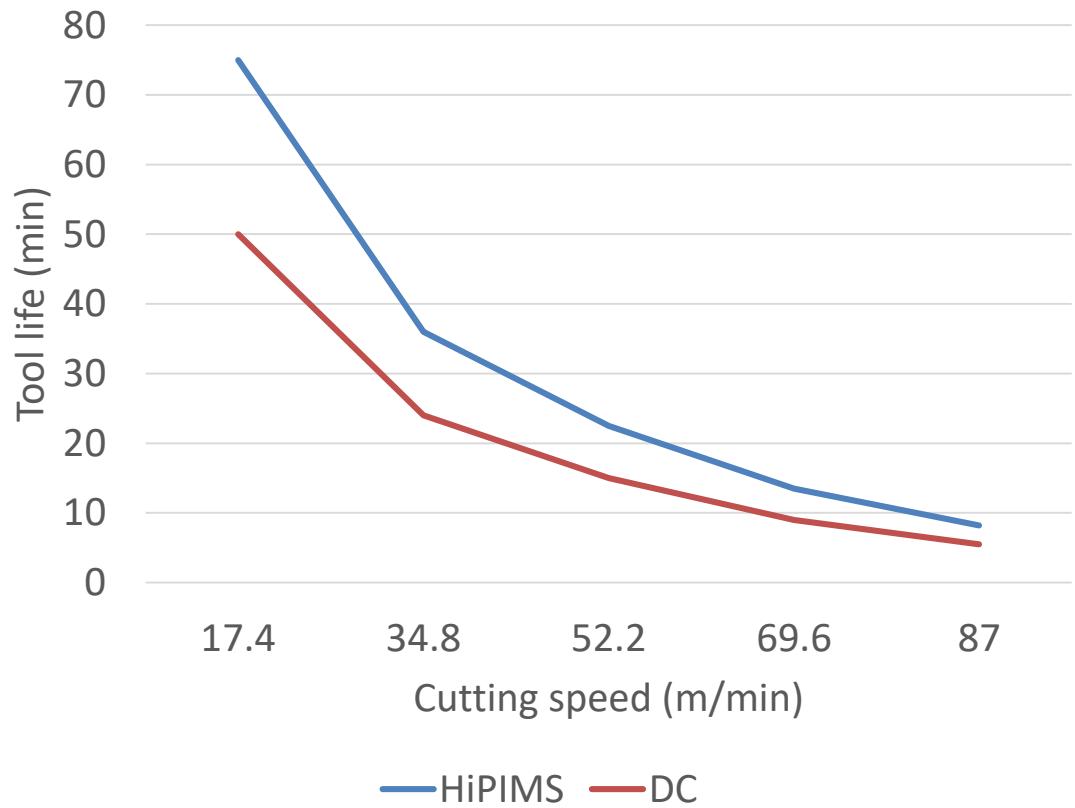


Figure 2: Cutting velocity - tool life relationship

Paramétrisation: équation de Taylor

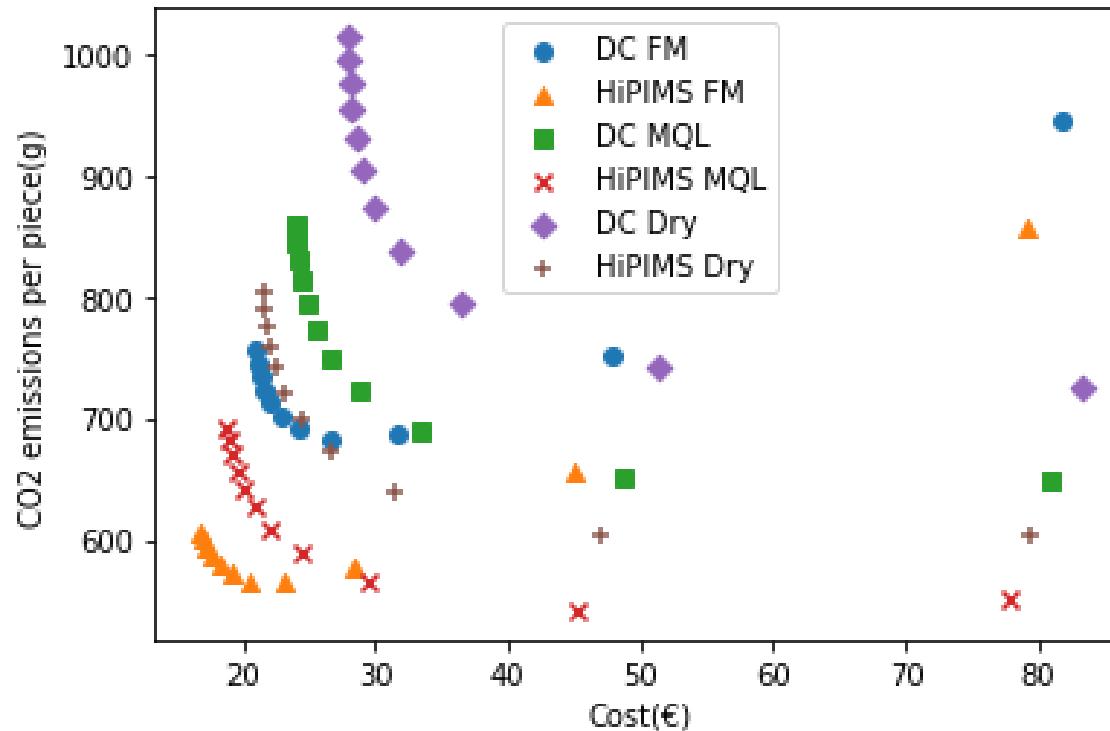
- Hypothèse: évolution des temps de vie comme dans *

- $$\frac{T(2V)}{T(V)} = \frac{T'(2V')}{T'(V')}$$



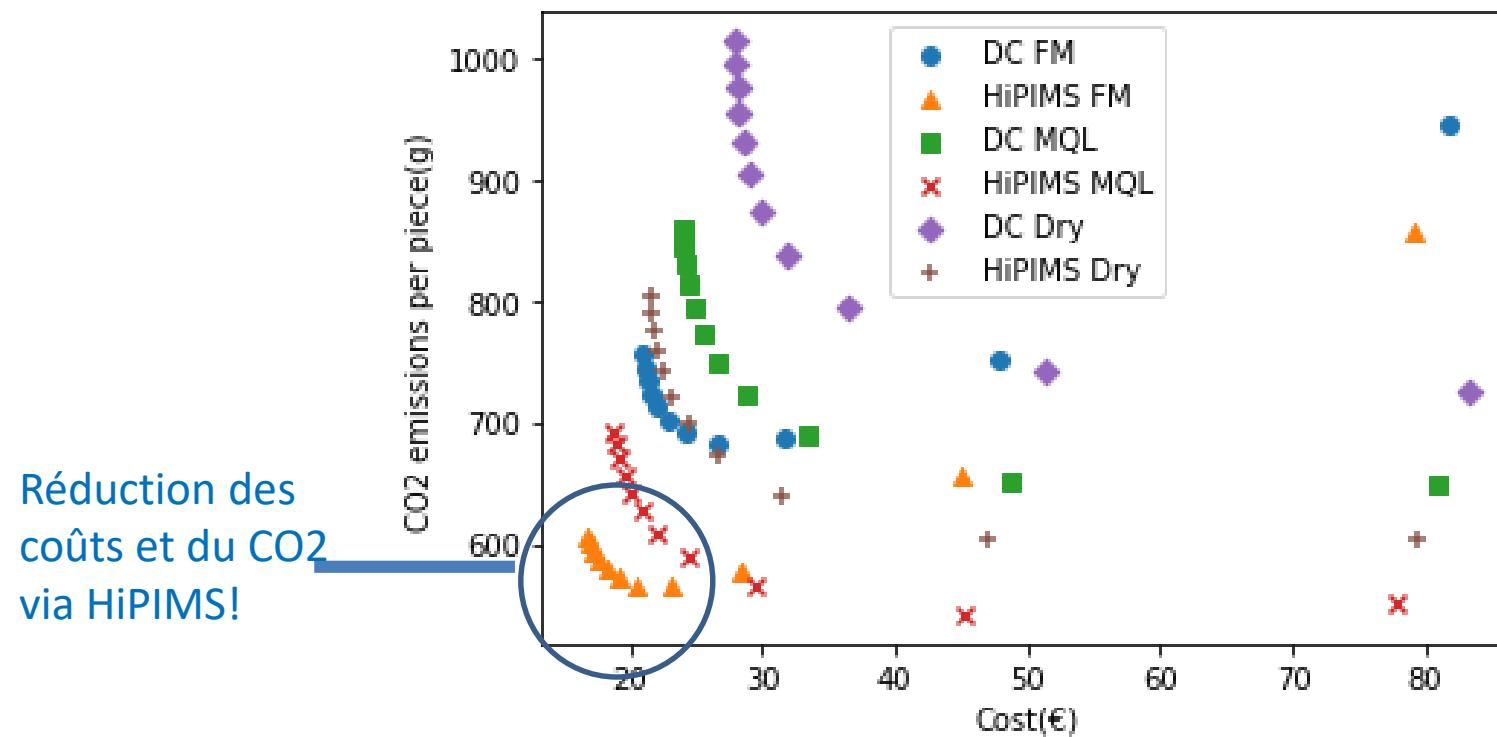
Paramétrisation

- Graphe des émissions CO2 contre coûts
- Différents scénarios de lubrification
- Variation de vitesse entre 5 et 100 m/min



Paramétrisation

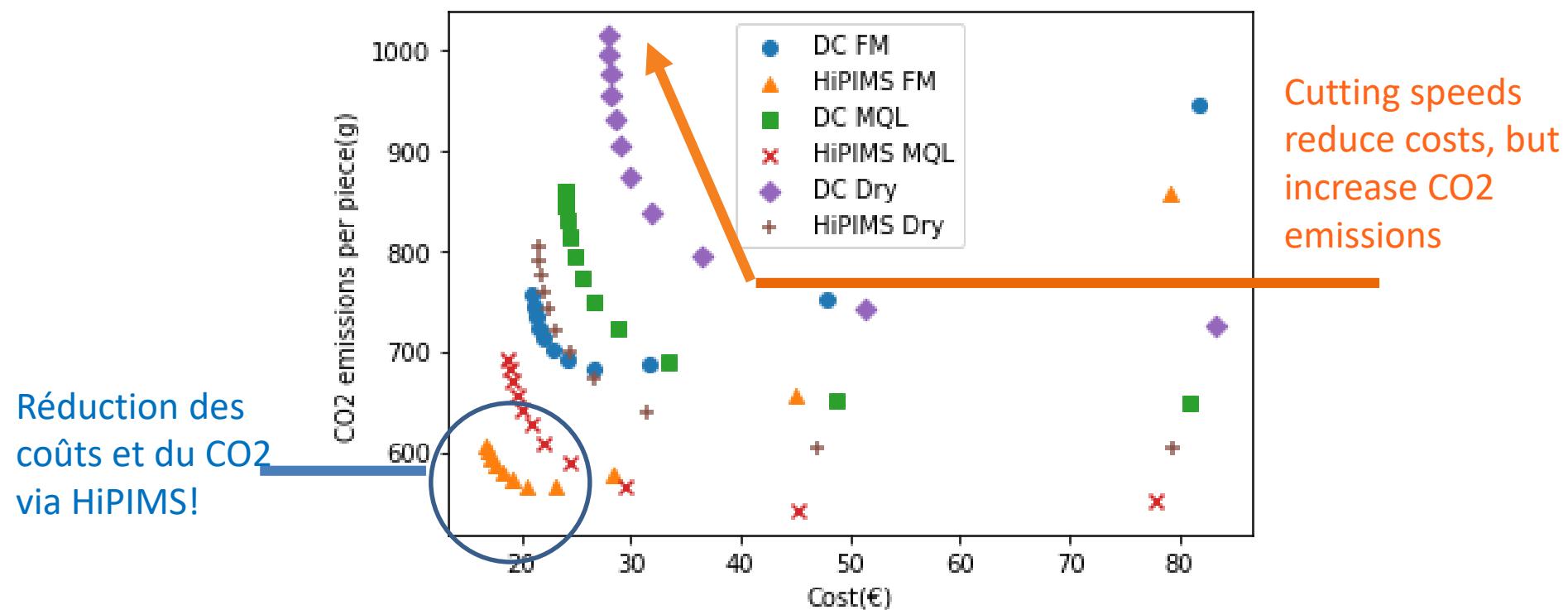
- Graphe des émissions CO2 contre coûts
- Différents scénarios de lubrification
- Variation de vitesse entre 5 et 100 m/min



Réduction des coûts et du CO2 via HiPIMS!

Paramétrisation

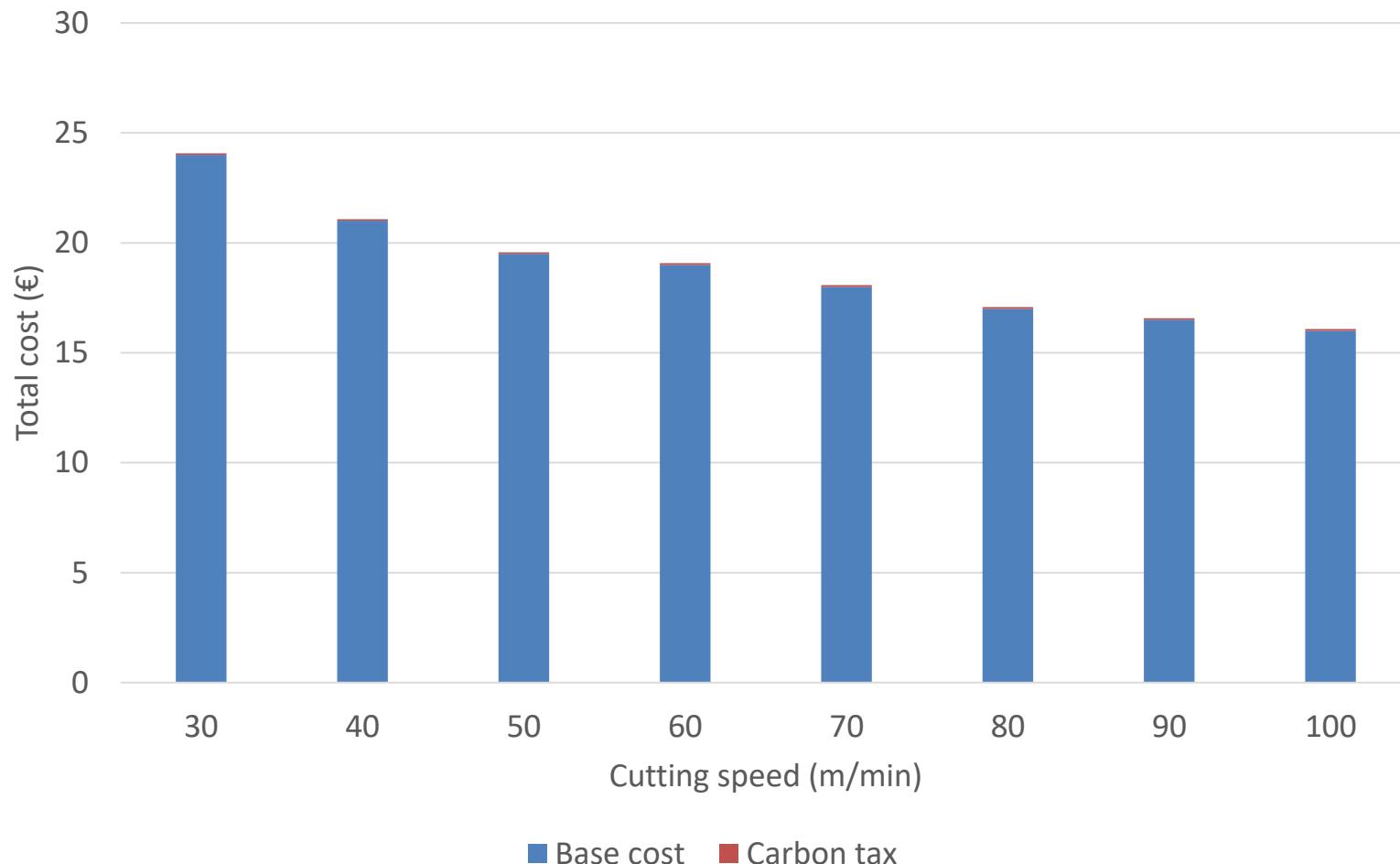
- Graphe des émissions CO2 contre coûts
- Différents scénarios de lubrification
- Variation de vitesse entre 5 et 100 m/min



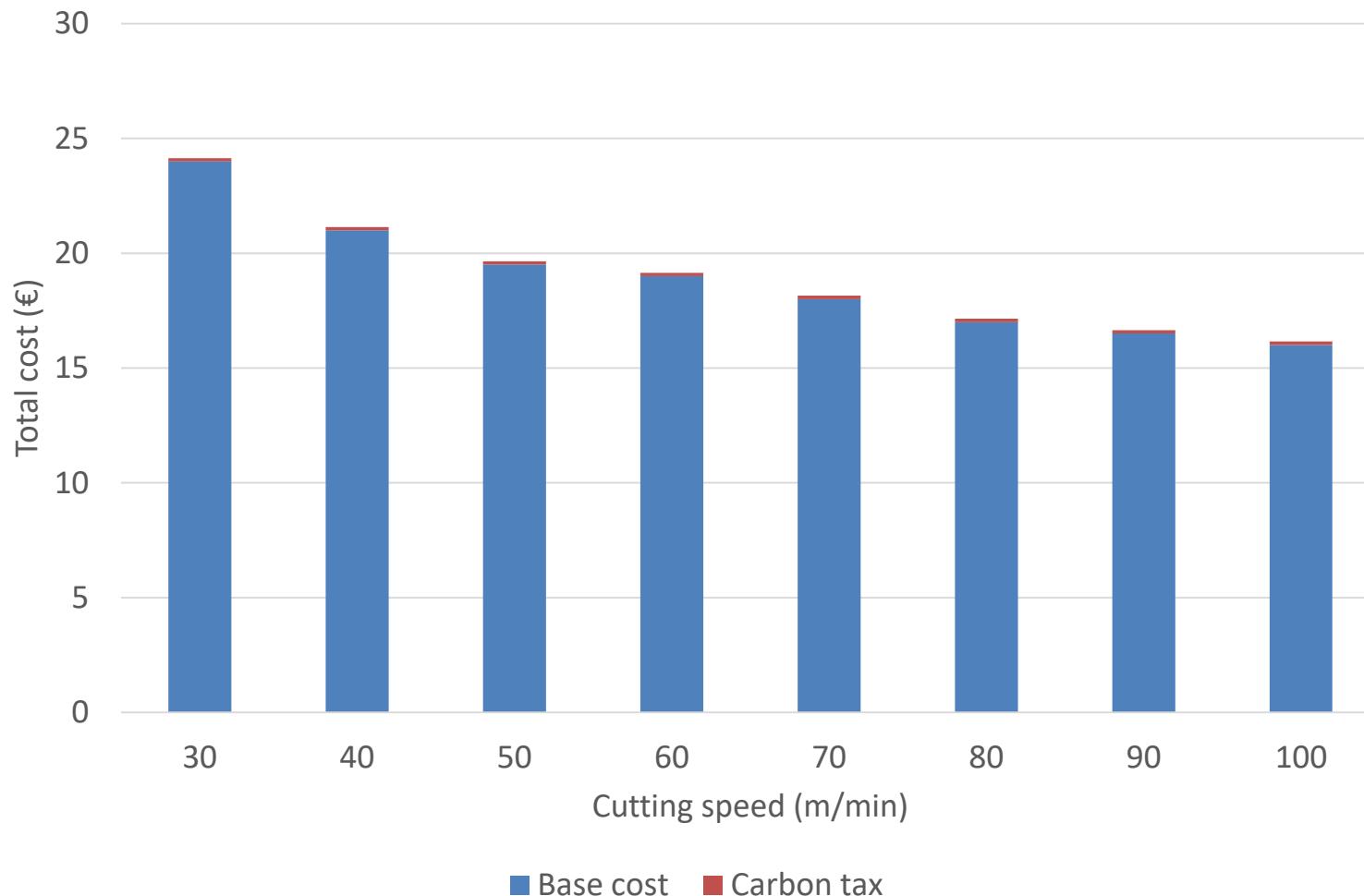
Paramétrisation conclusions

- Revêtements par HiPIMS les plus intéressants
 - Compromis entre émissions de CO2 et coûts
 - Choix d'une vitesse de découpe?
- Agrégation des émissions de CO2 par une taxe carbone

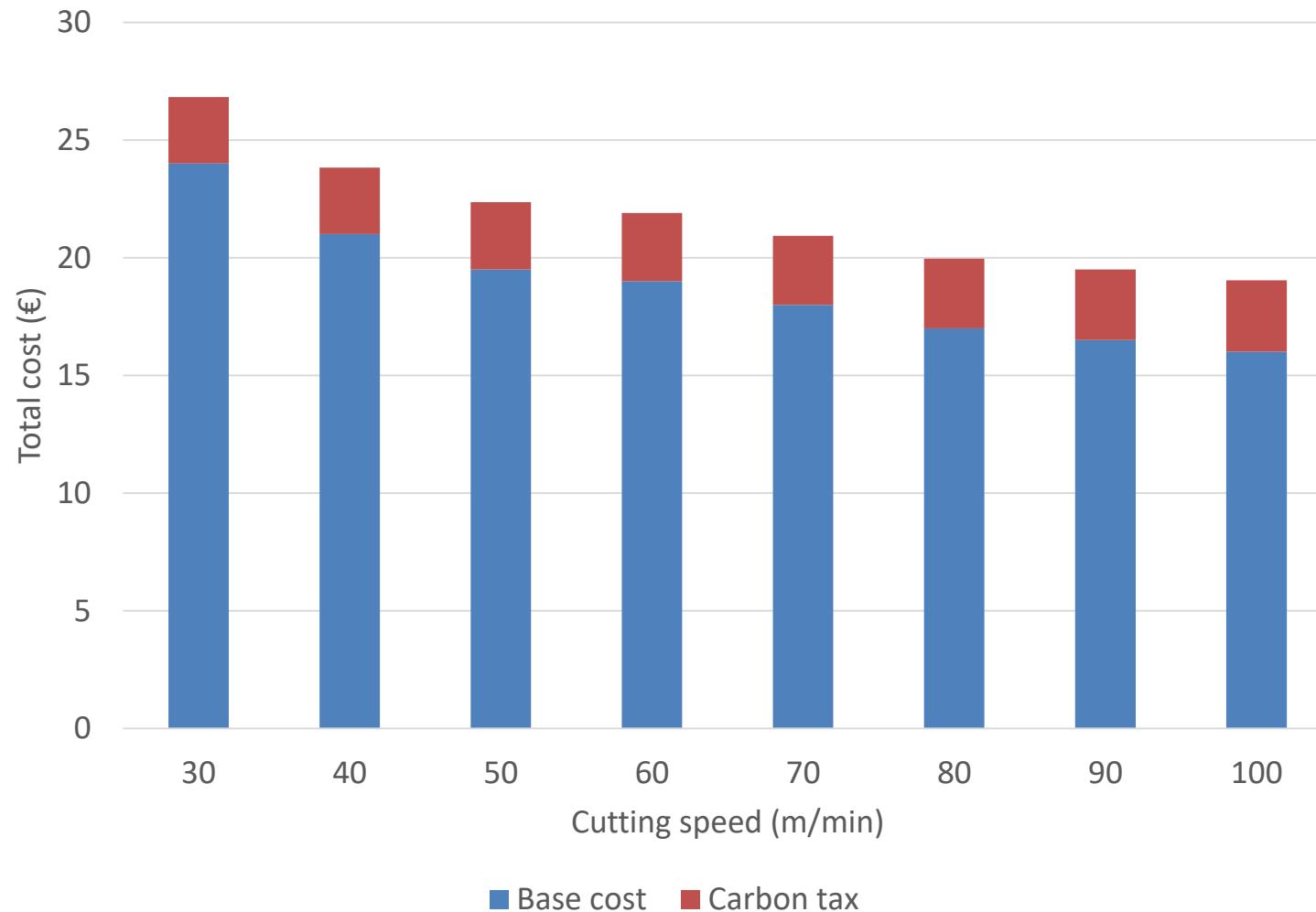
Taxe carbone : 120€/tCO2



Taxe carbone : 250€/tCO2



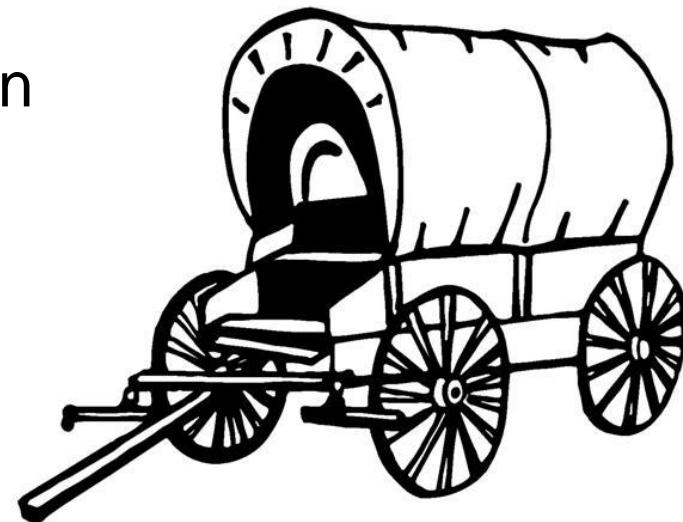
Taxe carbone : 5000€/tCO₂



Conclusions et perspectives

Conclusions

- Les techniques d'évaluation peuvent être utilisées sur des revêtements
- Importance des choix de revêtements
- Approche nuancée via une utilisation jointe
- Encore de nombreuses options pas encore explorées



Merci de votre attention!

Références

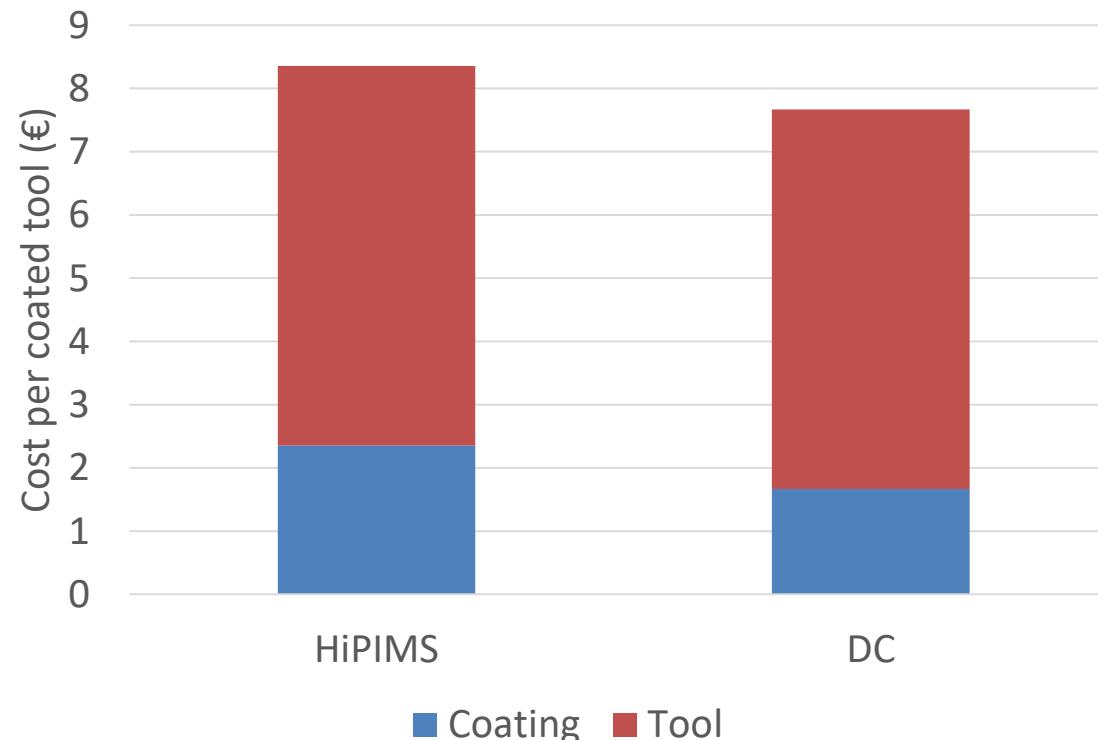
- [1] IndustryArc (2021). 'Cutting Tools Market - Forecast(2021 - 2026)'
- [2] Bobzin, K. (2016). 'High-performance coatings for cutting tools', *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*
- [3] Jindal, P.C. et al. (1999). 'Performance of PVD TiN, TiCN, and TiAlN coated cemented carbide tools in turning', *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 17, pp. 163-170.
- [4] Kottfer, D. et al. (2013). 'Investigation of Ti and Cr based PVD coatings deposited onto HSS Co 5 twist drills', *Applied Surface Science*, 282, pp. 770-776.
- [5] Münz, V.-D. (1986), 'Titanium aluminum nitride films: A new alternative to TiN coatings', *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 4(6)
- [6] Weichert, J. (2012). 'Titanium aluminum nitride sputtered by HIPIMS', *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*
- [7] Anders, A. (2010). 'Deposition rates of high power impulse magnetron sputtering: Physics and economics', *Journal of Vacuum Science & Technology A* 28, p. 783
- [8] Li, C. (2015). 'A quantitative approach to analyze carbon emissions of CNC-based machining systems', *Journal of Intelligent Manufacturing* 26, pp. 911-922

Backup

Cost evaluation if substrate included

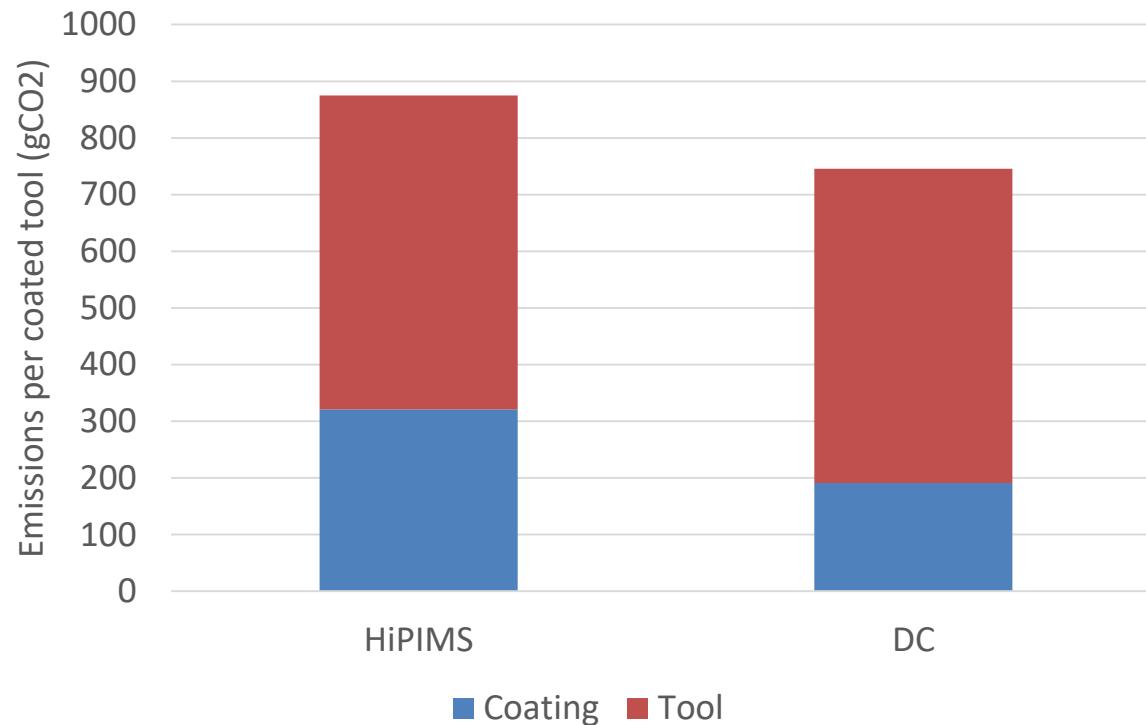
- Avg cost for 8mm HSS milling bits: 6€

→ Negligible difference for both technologies



Environmental impact with substrate

- Once again, reduced relative difference
- 875 gCO₂ vs 745 gCO₂



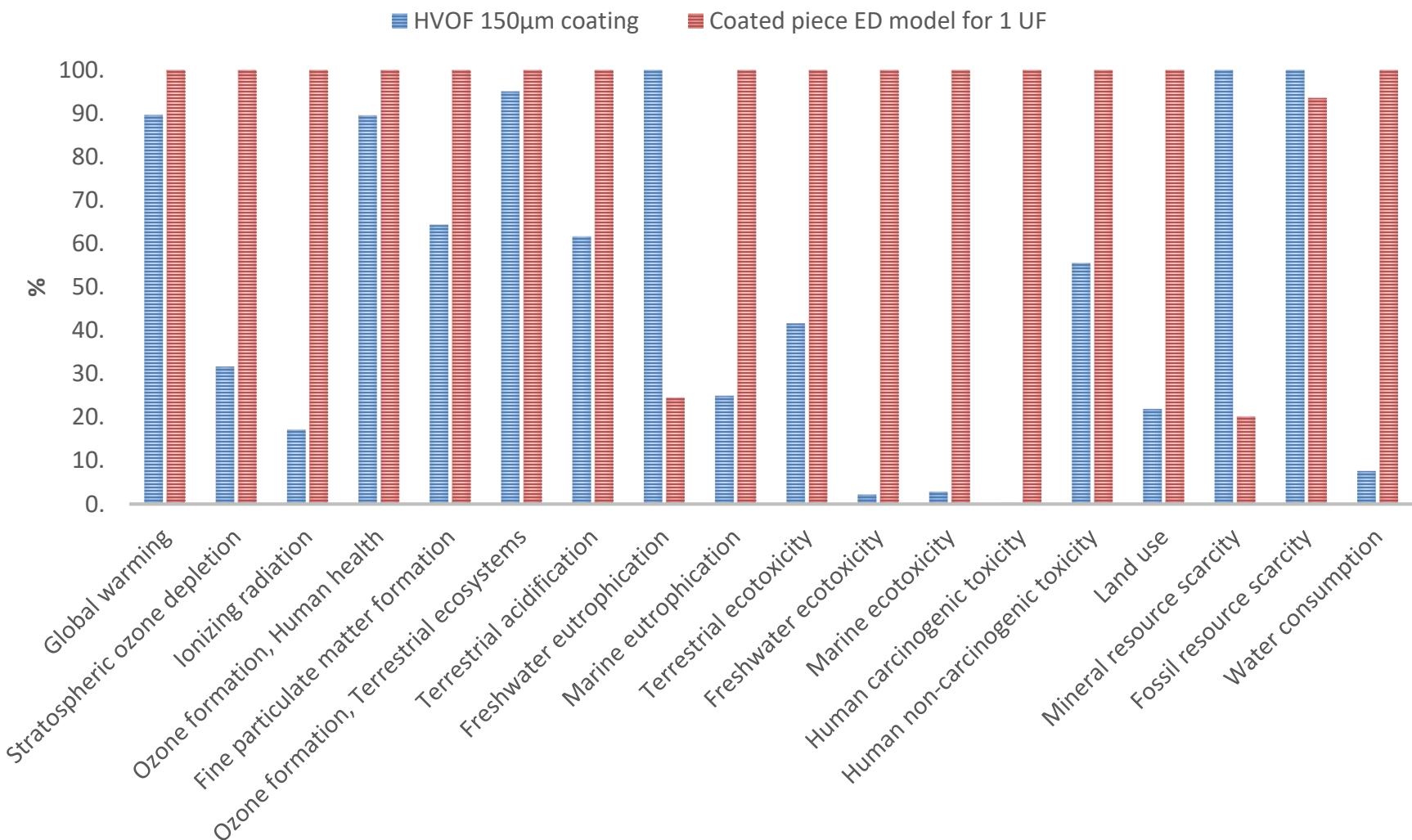
Coatings evaluation conclusions

- For the coating only: 41% increased cost and 68% increase in CO₂ emissions
- With a 50% increase in tool life, increased cost is justifiable (cost/min)
- If substrate is included, results **overwhelmingly** positive for HiPIMS

Other results: HVOF

- Evaluation of HVOF as another alternative to chromium electrodeposition
- Results from CRM installation parameters: 370€ (ED) vs 227€ (HVOF) per F.U.
 - Thanks to higher productivity and higher degree of automation
- Also promising due to lower environmental impacts

Other results: HVOF



TiAlN and cutting tools

- TiAlN : improvement of tool properties
- Developped from TiN[5], better corrosion resistance at higher T° (ox. 500-550°C for TiN vs 600°C for TiAlN) → Better performances at high speeds

Table 3. Coating mechanical properties [2]

Type of Coating	Hardness (GPa)	Hardness (HV _{0.05})	Thickness (μm)	Friction Coefficient	Heat Stability (°C)
TiN	23	2350	1 - 4	0.4	500
TiCN	27	2750	1 - 4	0.2	450
CrN	21	2100	1 - 4	0.6	700
TiAlN	32	3300	1 - 4	0.5	600
TiAlCN	29	3000	1 - 4	0.4	500

TiAIN Conclusions

- CO₂ emissions differences are negligible, even with aberrant carbon taxes
- HiPIMS in FM at high machining speeds seem to be the best option
- Need of experimental data to validate assumptions