

Simulation des performance de l'ensemble du cycle de vie pour guider le choix de conception des PSS dans le cadre industriel d'Elm Leblanc

Mariza MALIQI  
Xavier BOUCHER  
Jonathan VILLOT  
Damien LAMY



# SOMMAIRE

1. Contexte et objectif de recherche
2. Cadre de recherche
3. Méthodologie
4. Présentation de l'étude de cas
5. Résultats
6. Discussion
7. Conclusions

## Objectifs

- *Système produit-service (PSS) : "Un système de produits, de services, de réseaux d'acteurs et d'infrastructures de soutien qui s'efforce en permanence d'être compétitif, de satisfaire les besoins des clients et d'avoir un impact environnemental plus faible que les modèles d'entreprise traditionnels." [Goedkoop et al, 1999]*

### **Durabilité :**

- Durabilité environnementale
- Efficacité économique

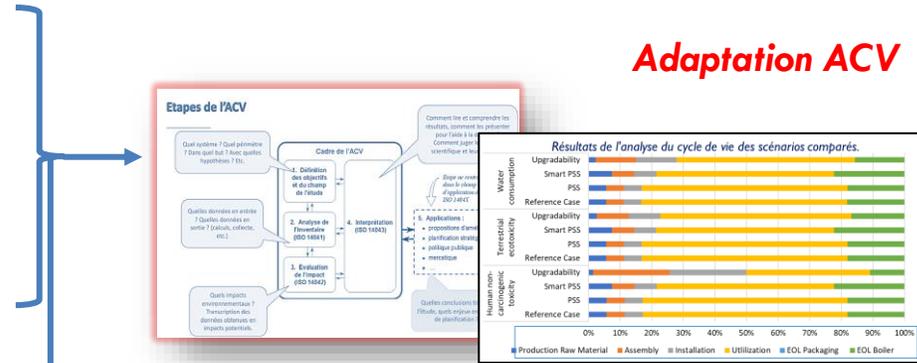
→ *Analyse comparative des impacts environnementaux et économiques de l'économie circulaire.* →

- Ecoconception
- Organisation de la production de valeur
- Choix de la meilleur solution PSS proposée

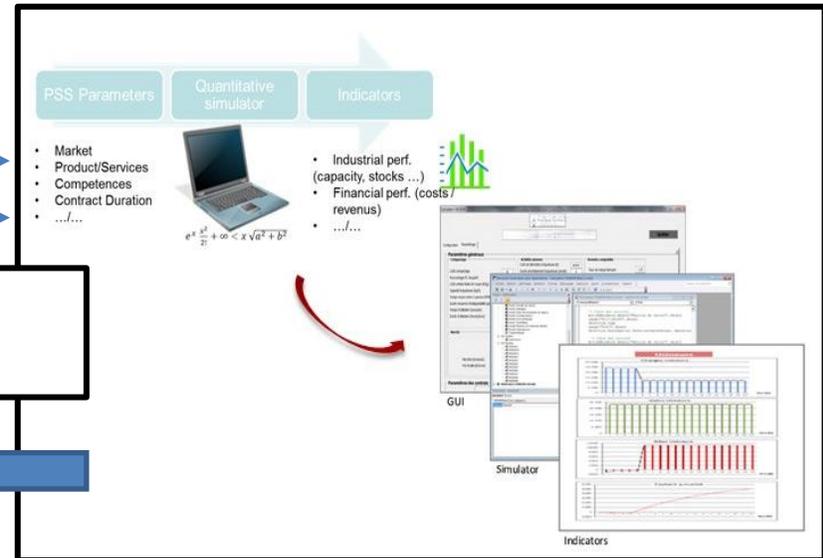
- **Les objectifs** de ce travail de recherche sont **d'aider à la décision de la meilleur solution (PSS)** dans le domaine **d'application spécifique des systèmes de chauffage**; et de proposer **une méthode** pour **évaluer les avantages environnementaux quantitatifs** de la mise en œuvre d'un **PSS intelligent**.

## Coupler l'analyse environnementale et économique

- Nouveaux paramètres techniques et économiques du ballon du futur
- Scénarios de procédés de production
- Scénarios d'offres PSS



**Caractérisation environnementale d'un Cycle de Vie Unitaire**



**Simulateur d'une population d'utilisateurs et de cycle de vie:  
Modèle économique + Modèle environnemental**

- Confrontation des impacts économiques et environnementaux
- Analyses d'incertitudes et aide à la décision sur le long terme

## Aide à la décision

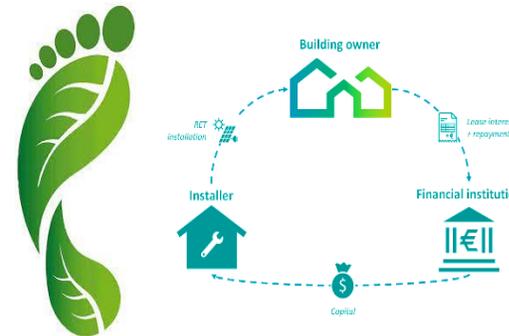
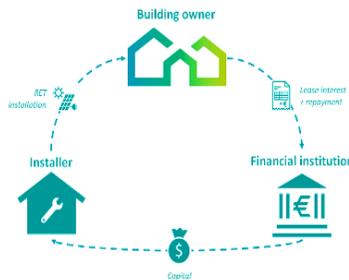
**Phases de  
aide à la  
décision**

1. Analyse  
performance  
environnemental

2. Analyse  
performance  
économique

Confrontation des  
critères économique-  
environnemental

4. Choix de la  
meilleur solution  
(multi-critère multi-  
acteur)



**Simulation  
ou Méthode**

1. ACV (OpenLCA)

2. VBA-Macro-Excel

3. VBA-Macro-Excel

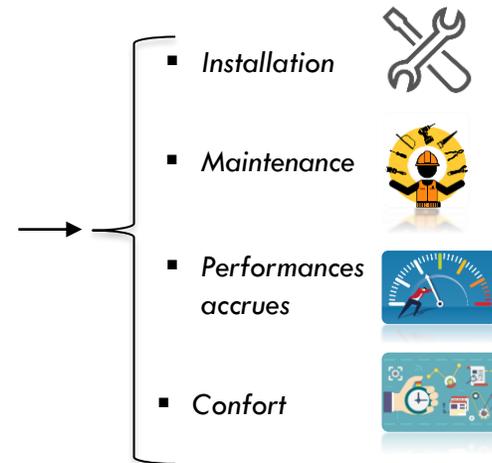
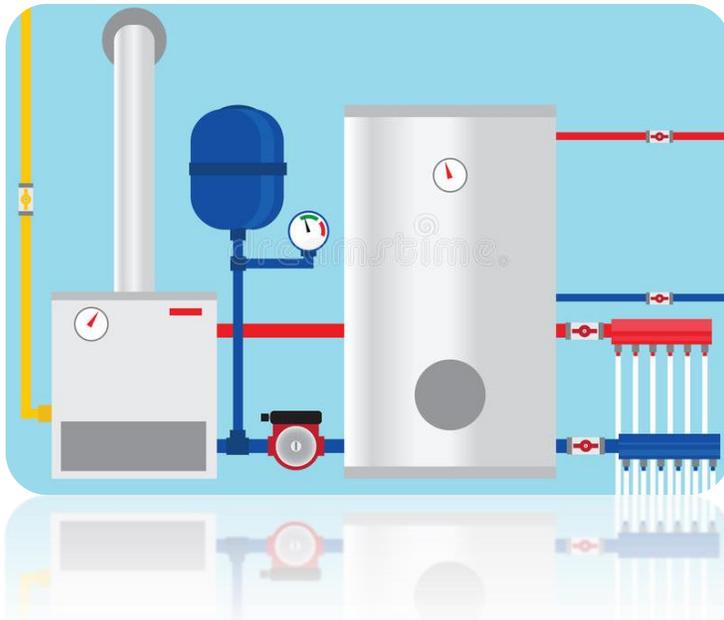
4. PROMETHEE II

## Le cadre des systèmes de systèmes produit-service intelligents (Smart PSS)

(Appareil de chauffage domestique)

### Le cadre des PSS

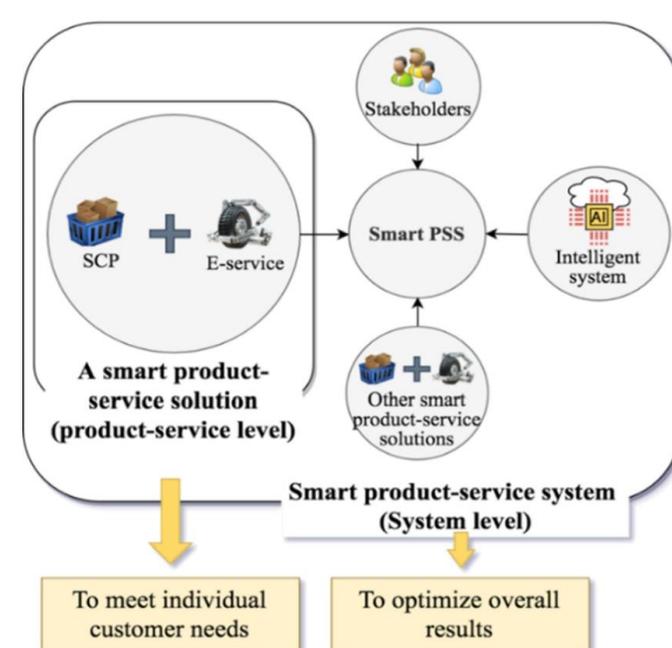
Systeme de chauffage : Groupe externe de pompe à chaleur +  
Réservoir d'eau chaude sanitaire



Source: VectorStock.com

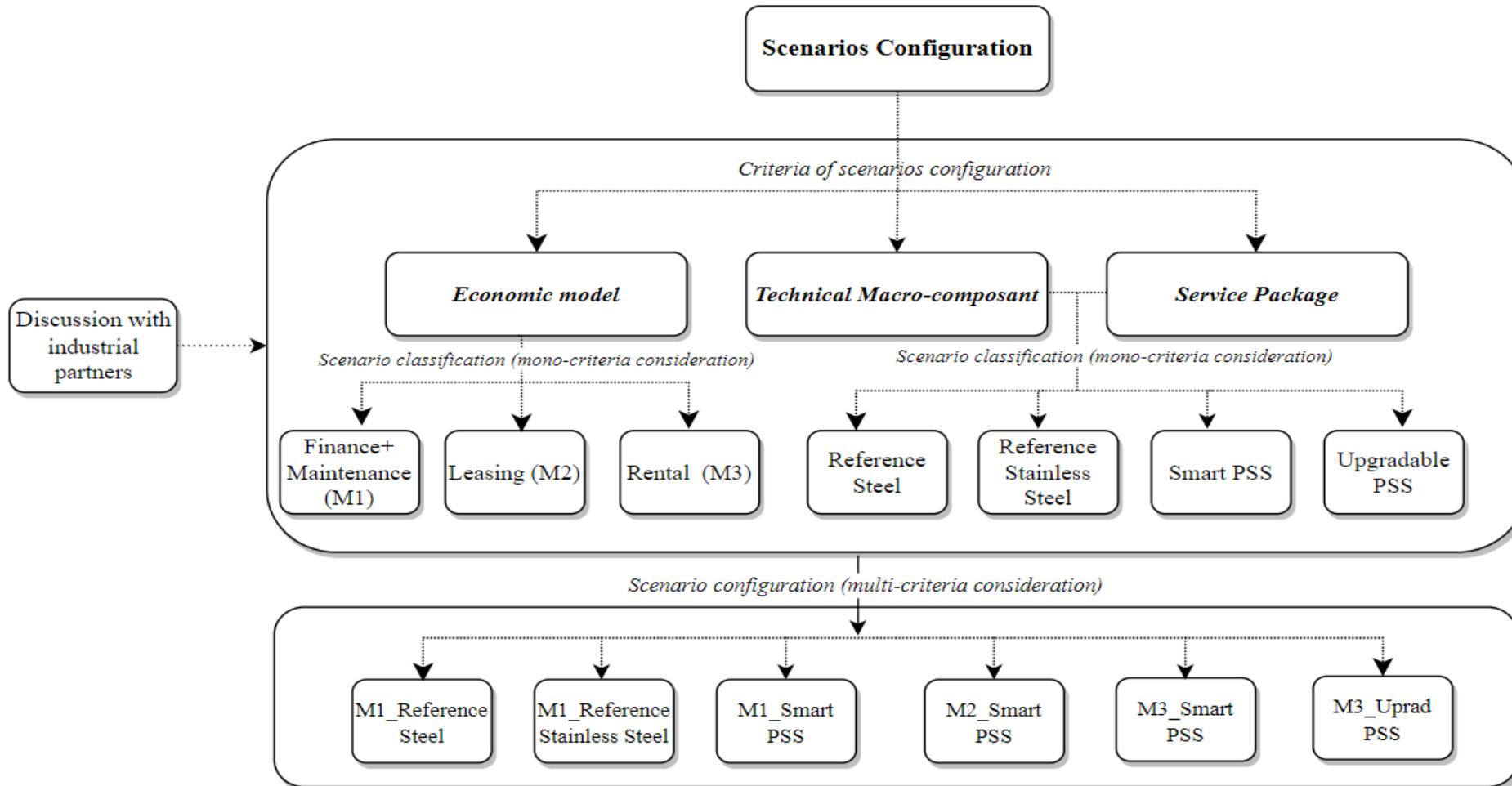
### Proposition pour le groupe Bosch

Configuration des scénarios Smart PSS:



Source: ScienceDirect.com

## Configuration des scénarios PSS





***Simulation de la performance environnementale des PSS (système de chauffage)***

# Configuration d'une méthode ACV au smart PSS

## Les phases de l'ACV :

### Objectifs et champ de l'étude:

- La définition de l'**unité fonctionnelle** est une illustration de ce besoin pour l'adaptation au Smart PSS.

### Analyse de l'inventaire:

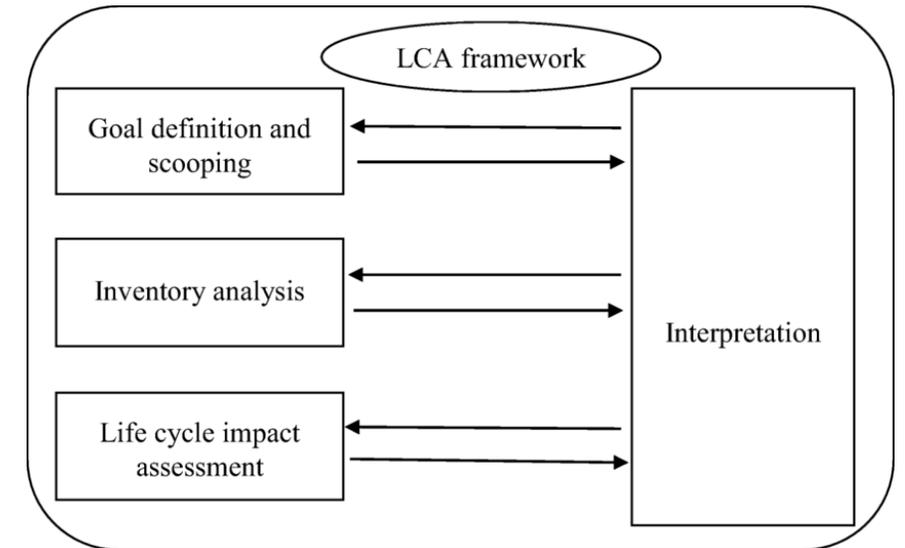
- Ecoinvent v3.8 database
- Chaque scénario PSS nécessite **un inventaire spécifique**
- **Types d'inventaire particuliers** (inventaire des matériels TIC)

### Evaluation des impacts:

- **Différencier les scénarios** afin de déterminer celui qui présente les meilleures caractéristiques environnementales
- Méthode de caractérisation ReCiPe

### Interprétation:

- **l'analyse des incertitudes Monte-Carlo** liées aux **hypothèses** envisagées (détermine quel **scénario domine** sur un autre en raison des incertitudes).



Source: ISO 14040 Standard, 1997

# Modélisation et comparaison des scénarii

Offre de PRODUIT-SERVICE-SYSTEM			
	Référence	Smart PSS	PSS Upgradable
– <b>Différentie macro composants</b>	– <b>Basic système</b> (Pompe à chaleur air /eau + Ballon de stockage d'eau chaude en <b>acier/inox</b> ) avec une durée de VIE (17 ANS).	– <b>Basic système</b> (Pompe à chaleur air /eau + Ballon de stockage d'eau chaude en <b>inox +polyuréthane</b> ) avec une durée de VIE de <b>20 ANS</b> . – Installation de <b>la solution OPTIBOX</b> – Participation du système TIC	– <b>Système renouvelable</b> ( Pompe à chaleur air/eau + <b>Ballon</b> d'eau chaude en <b>inox polyuréthane</b> + Optibox) avec une durée de VIE de <b>30 ANS..</b> – <b>3 upgradable</b> (changement de groupe extérieure dans chaque 15 ans; ajouter une nouvelle serpentine; panneaux solaire)
– <b>Différentie (facteur service)</b>	– <b>Maintenance réglementaire</b> (maintenance obligatoire pour assurer le bon fonctionnement du système du produit (fréquence=1 fois/ans). – <b>Maintenance curative</b> (fréquence =1 fois/2ans)	– <b>Reduction</b> de la consommation d' <b>électricité</b> (Hypothèse à <b>15%</b> ) – Prolongation de la durée de vie de système – <b>Organisation</b> des services de transport – Maintenance ( <b>réglementaire et préventive</b> → <b>OPTIBOX</b> ) – Maintenance <b>curative</b> (fréquence =1 fois/2ans) → <b>reduction</b> à cause de <b>organization de transport</b> – Avancer progressivement dans l'aspect de <b>réduction des coûts</b> de <b>la gestion et de la planification</b> dans la phase de maintenance.	– <b>Reduction</b> de la consommation d' <b>électricité</b> (Hypothèse à <b>60%</b> ) – Prolongation de la durée de vie de système – Maintenance ( <b>réglementaire et préventive</b> → <b>OPB</b> ) – Maintenance <b>curative</b> (fréquence =1 fois/2ans) → <b>reduction</b> à cause de <b>organization de transport</b> – Avancer progressivement dans l'aspect de <b>réduction des coûts</b> de <b>la gestion et de la planification</b> dans la phase de maintenance.
– <b>Différentie (ACV)</b>		– Effet (+) liée à la réduction de transport de maintenance – Effet (+) liée à la réduction de consommation d'énergie – Effet (-) liée à la production d'OPTIBOX – Effet (+) liée à la réparation des effets négatifs de la production sur une plus longue période de durée de vie	– Effet (+) liée à la réduction de consommation d'énergie – Effet (-) liée à la production d'OPTIBOX – Effet (-) liée à la production de panneaux solaire – Effet (-) liée à la production d'une serpentine secondaire – Effet (+ +) liée à la réparation des effets négatifs de la production sur une plus longue période de durée de vie

Différents impacts environnementaux

# Résultats (Analyse environnemental)

Les phase de analyse des résultats ( ANALYSE CYCLE DE VIE)

## 1. La phase de traitement de résultats (d'analyse de cycle de vie) sans avoir l'incertitude

- **Point de vue général: 18 indicateurs environnementaux de la méthode de caractérisation**

### ReCiPe

- **Point de vue industriel d'elm: climate change; water depletion; metal depletion; fossil depletion; ozone depletion**

## 2. L'analyse d'incertitude Monte Carlo (pour un sous-groupe des inputs pour lesquels nous n'avons pas d'informations précises) pour comprendre la classification des scénarios selon le critère de la robustesse.

# Résultats (sans l'incertitude)

- Comparaison des scénarios pour chaque catégorie d'impact

Indicator	Unit	Acier (référence)	Inox	Smart PSS	PSS Upgradable
agricultural land occupation - ALOP	m2a	100,0%	97,2%	72,3%	29,8%
climate change - GWP100	kg CO2-Eq	100,0%	98,7%	81,0%	52,6%
fossil depletion - FDP	kg oil-Eq	100,0%	98,6%	80,0%	48,3%
freshwater ecotoxicity - FETPinf	kg 1,4-DCB-Eq	100,0%	70,8%	45,7%	56,5%
freshwater eutrophication - FEP	kg P-Eq	100,0%	80,5%	51,0%	61,9%
human toxicity - HTPinf	kg 1,4-DCB-Eq	100,0%	83,7%	55,5%	77,0%
ionising radiation - IRP_HE	kg U235-Eq	100,0%	100,3%	73,2%	49,4%
marine ecotoxicity - METPinf	kg 1,4-DCB-Eq	100,0%	71,2%	46,1%	57,2%
marine eutrophication - MEP	kg N-Eq	100,0%	94,8%	74,0%	49,2%
metal depletion - MDP	kg Fe-Eq	100,0%	66,5%	43,4%	87,8%
natural land transformation - NLTP	m2	100,0%	104,7%	90,2%	46,1%
ozone depletion - ODPinf	kg CFC-11-Eq	100,0%	100,4%	105,5%	68,6%
particulate matter formation - PMFP	kg PM10-Eq	100,0%	93,2%	77,7%	88,4%
photochemical oxidant formation - POFP	kg NMVOC	100,0%	90,8%	71,2%	63,2%
terrestrial acidification - TAP100	kg SO2-Eq	100,0%	101,3%	83,4%	95,9%
terrestrial ecotoxicity - TETPinf	kg 1,4-DCB-Eq	100,0%	105,5%	95,2%	129,4%
urban land occupation - ULOP	m2a	100,0%	102,0%	83,0%	81,4%
water depletion - WDP	m3	100,0%	100,1%	84,4%	52,0%

interprétation

Légende:  
■ effet élevé  
■ effet moyenne  
■ effet faible

1. nb de catégories d'impact pour lequel un scénario le plus impactant

Acier	Inox	Smart	Upgradable
11	5	1	1

2. nb de catégories d'impact pour lequel un scénario le moins impactant

Smart	Upgradable
8	10

3. Le meilleur scénario

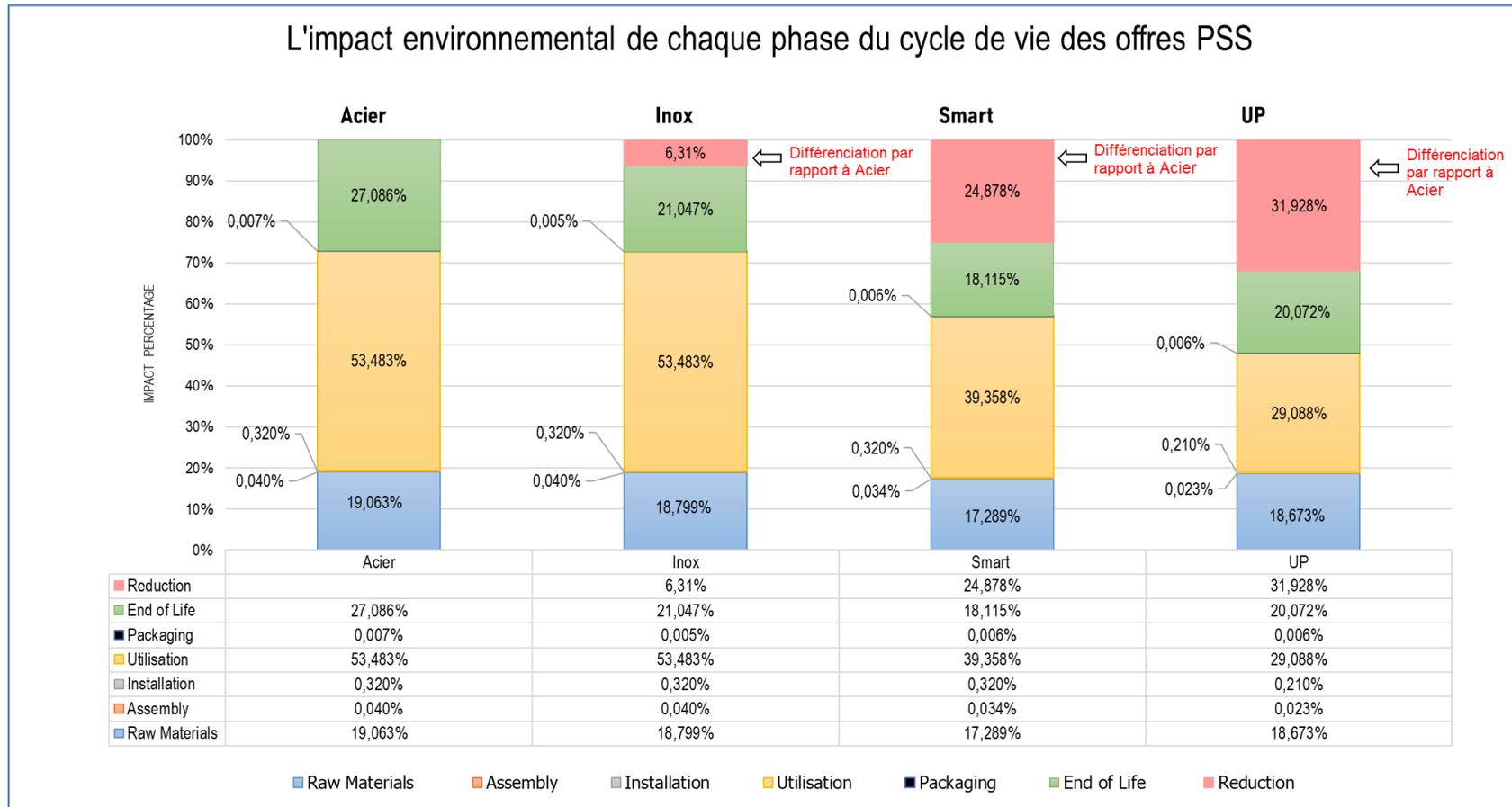
**Upgradable** → réduction de l'impact dans la plupart des catégories

**Evaluation de la réduction d'impact environnemental des scénarios:**

	référence	Inox	Smart PSS	PSS UP
Réduction d'impact (18 indicateur)	référence	7,76%	27,07%	35,70%
Réduction d'impact ( indicateur elm)	référence	7,13%	21,15%	38,16%

# Résultats (sans l'incertitude)

- L'impact environnemental de chaque phase du cycle de vie des offres PSS



➤ La phase la plus **impactante** sur l'environnement est la phase **d'utilisation**.

➤ **Le classement** de phase de cycle de vie du plus **impactant** au **moins impactant**: **Utilization, End-of-Life, Production Raw Materials, Assembly, Installation, Packaging**.

➤ Le PSS intelligent vise à **réduire l'impact** environnemental pendant **la phase d'utilisation** grâce à plusieurs mesures. (la réorganisation des services de transport, la maintenance préventive et l'optimisation e l'utilisation de l'énergie).

➤ On a une **réduction d'impact** dans la phase **d'utilisation** (53,483% ➔ 29,088%) et de la **fin de vie** (27,086% ➔ 18,115%) et la phase de la **production raw materials** (19,063% ➔ 17,289%) en scénarios de Inox, Smart PSS, PSS UP.



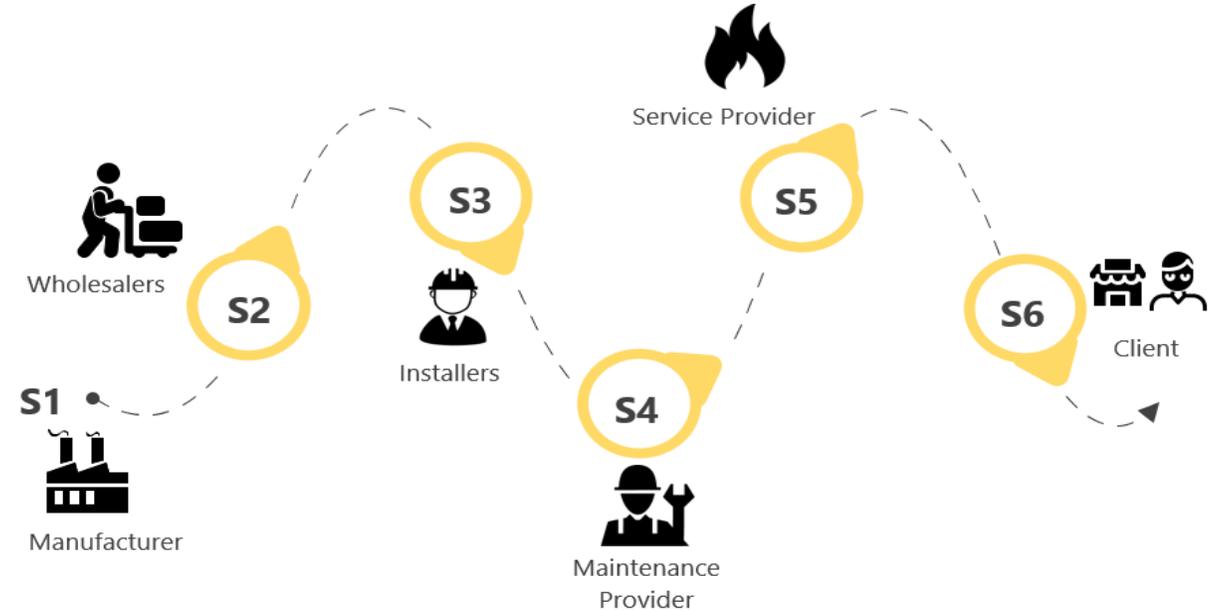
***Simulation de la performance économique des PSS (système de chauffage)***

# Configuration des scénarios PSS selon le critère économique

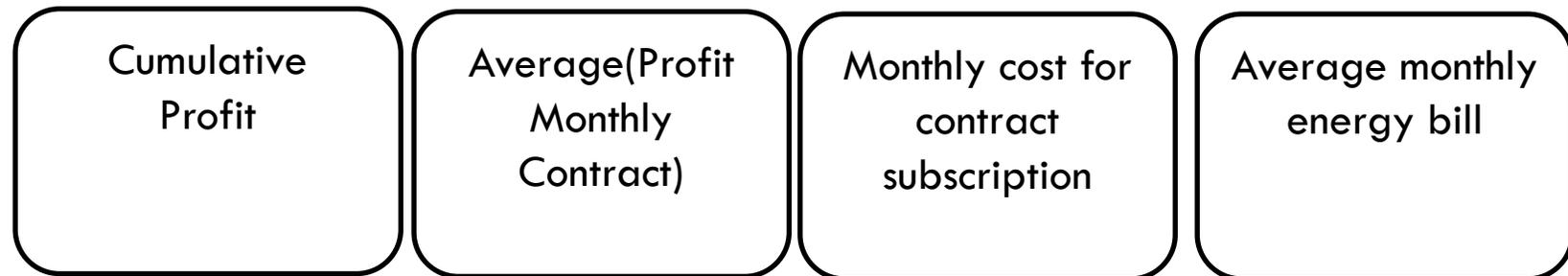
	<b>Finance and maintenance contract (M1)</b>	<b>Leasing (M2)</b>	<b>Rental (M3)</b>
<b>Economic model</b>	Product-oriented	Use-oriented	Use-oriented
<b>Frequent duration of the contract</b>	Five years	From eight to twelve years	Minimum two years
<b>Conditions of contract and responsibility</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) The Customer owns the heating appliance</li> <li>2) End of Contract by client – reimburse the remaining amount of the credit</li> <li>3) This contract includes the maintenance cost but spare parts are extra charged to client</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) The service provider owns the heating appliance</li> <li>2) End of Contract by client – they can either buy the appliance for its residual value or have it uninstalled</li> <li>3) This contract includes the maintenance cost and spare parts</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) The service provider owns the heater appliance</li> <li>2) End of Contract by client Only the option to uninstalled the appliance</li> <li>3) This contract includes the maintenance cost and spare parts</li> </ol>

# Simulation de performance économique

## ➤ Identification des acteurs



## ➤ Identification des critères



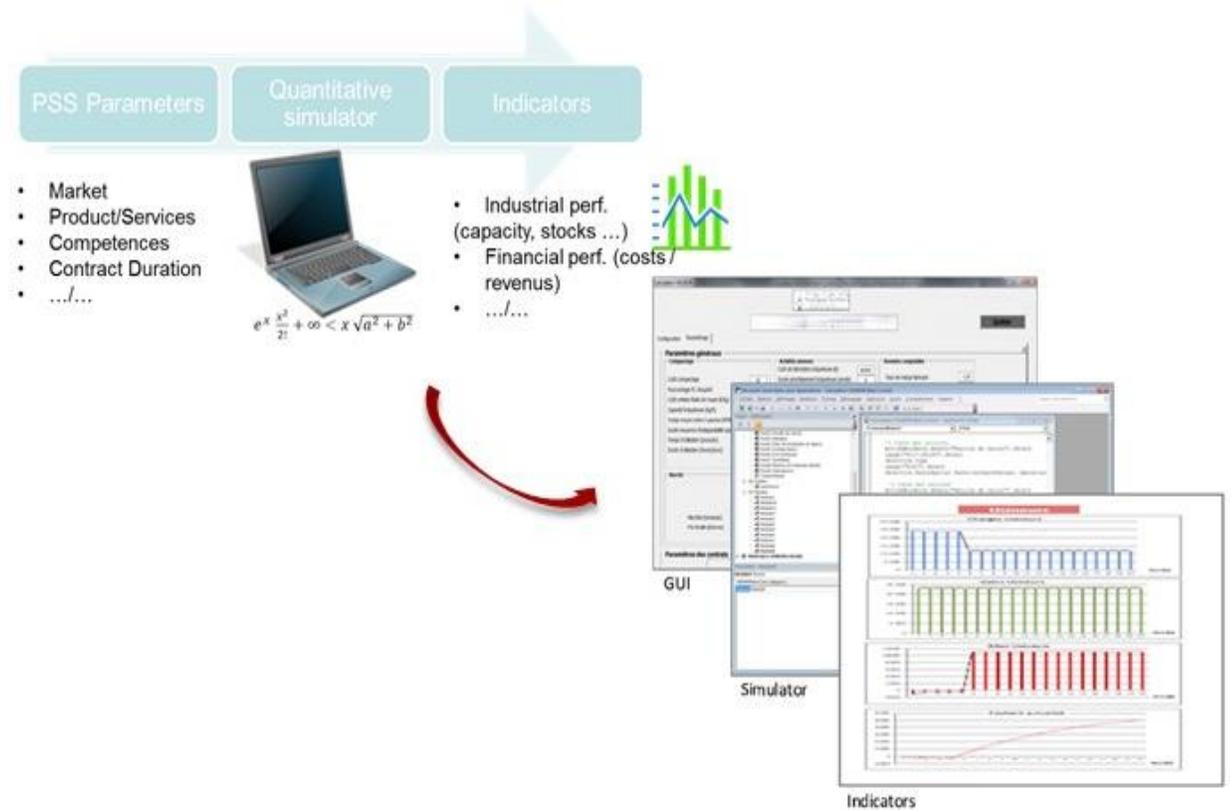
## ➤ Identification des alternatives



# Simulation de performance économique

➤ *Simulation VBA-macro Excel*

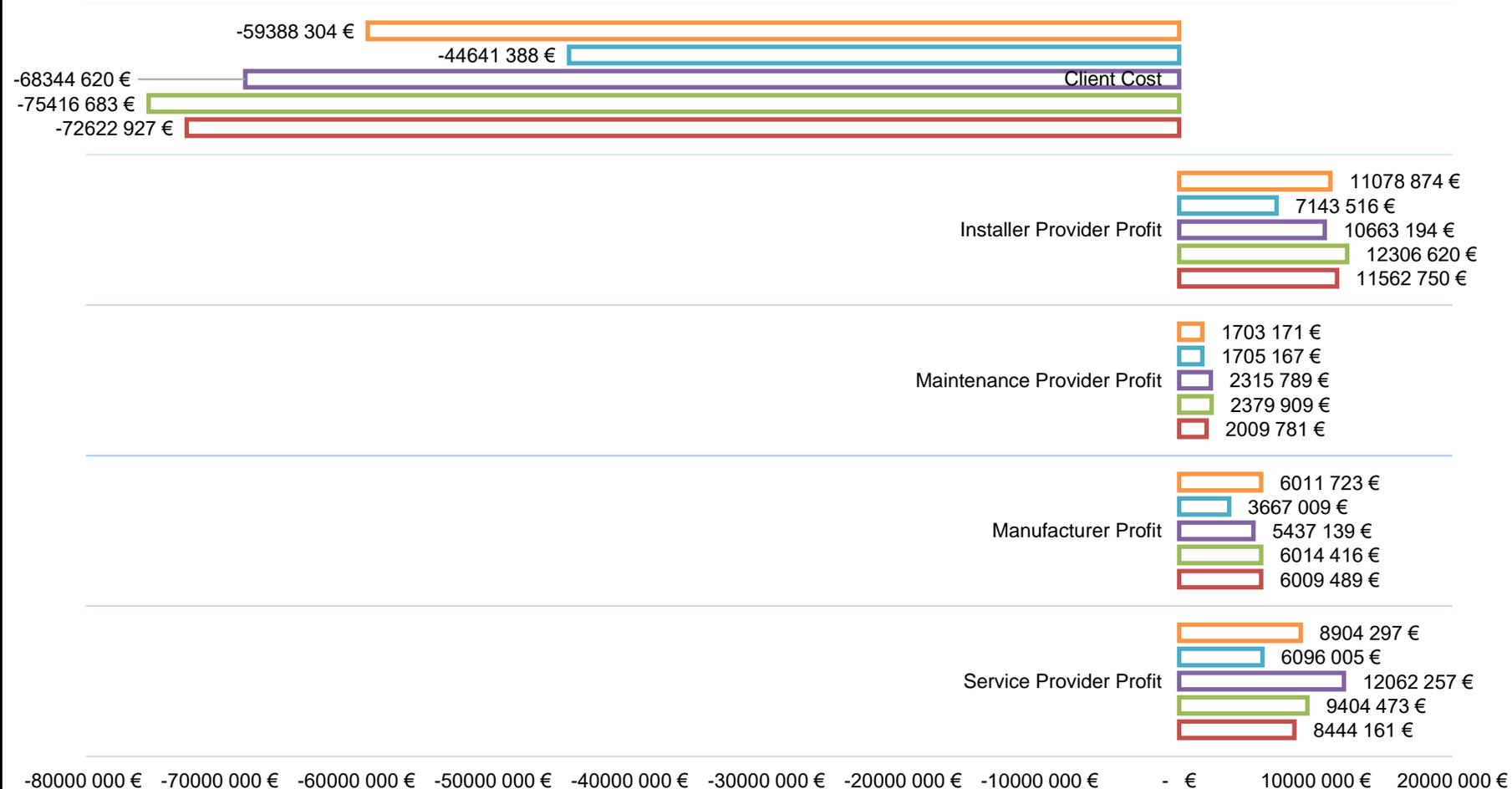
➤ *Analyse des résultats pour de chaque scénario pour chaque acteur*



# Résultats (Analyse économique)

## Overall economic analysis

■ M3\_Upgradable\_Inox 
 ■ M3\_Smart\_Inox 
 ■ M2\_Smart\_Inox 
 ■ M1\_Smart\_Inox 
 ■ M1\_Inox



**Meilleure solution (point de vue économique) pour chaque acteur:**

- Service Provider (M2-Smart PSS)
- Manufacture (M3-Upgradable)
- Maintenance (M1-Smart PSS)
- Installer (M1-Smart PSS)
- Client (M3-Smart PSS)

**Les facteurs affectant la rentabilité des scénarios:**

- Nombre des contrats pour chaque modèle économique
- Durée de la contract



## ***Méthode multicritères multi-acteurs pour les PSS (PROMETHEE II)***

## Step 1: Simulation for scenario evaluation

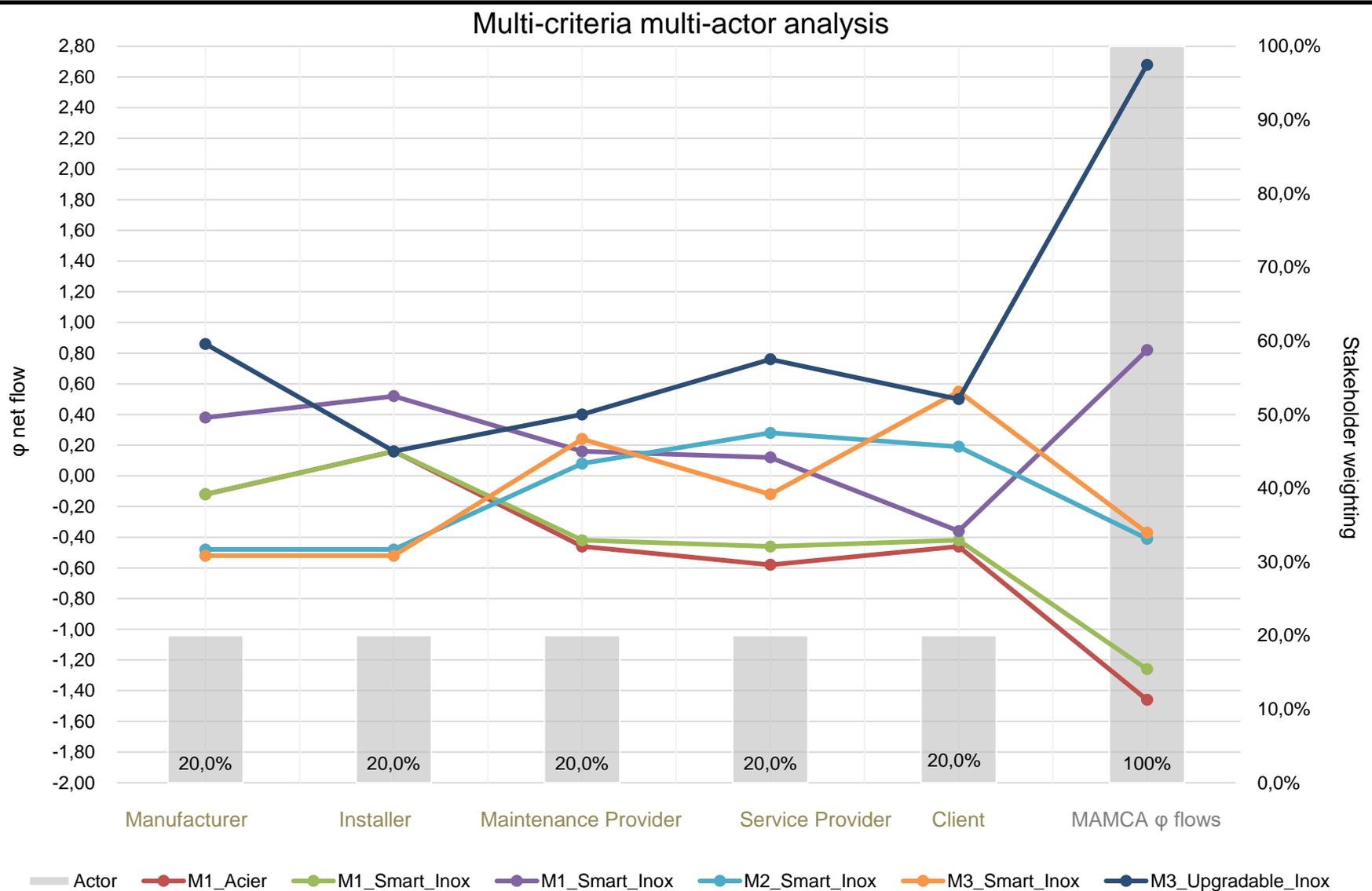
## Step 2: Multi-criteria analysis

## Step 3: Multi-actor analysis

## Selection of the best SCENARIO

- *construire une simulation économique-environnementale multicritère en VBA-macro excel*
- *on a choisi 4 critères (2 critères économiques, 2 critères environnementaux ): cumulative economic profit, monthly contract profit, the monthly cost of the heat pump system, average monthly energy bill, CO2 emissions, ozone depletion*
- *différents poids d'importance des critères pour chaque acteur*
- *nous trouvons ici des solutions multicritères optimales pour l'ensemble des acteurs*
- *la solution proposée sera mise en œuvre sur le marché, présentant une offre de PSS innovante et durable.*

# Résultats (Analyse multicritères multi-acteurs)



**Meilleure solution (multicritères) pour chaque acteur:**

- Manufacture (M3-Upgradable)
- Installer (M1-Smart PSS)
- Maintenance Provider (M3-Up PSS)
- Service Provider (M3-UP)
- Client (M3-Smart PSS)

**Meilleure solution (multicritères) pour l'ensemble des acteurs:**

- M3-UP PSS

## Conclusion

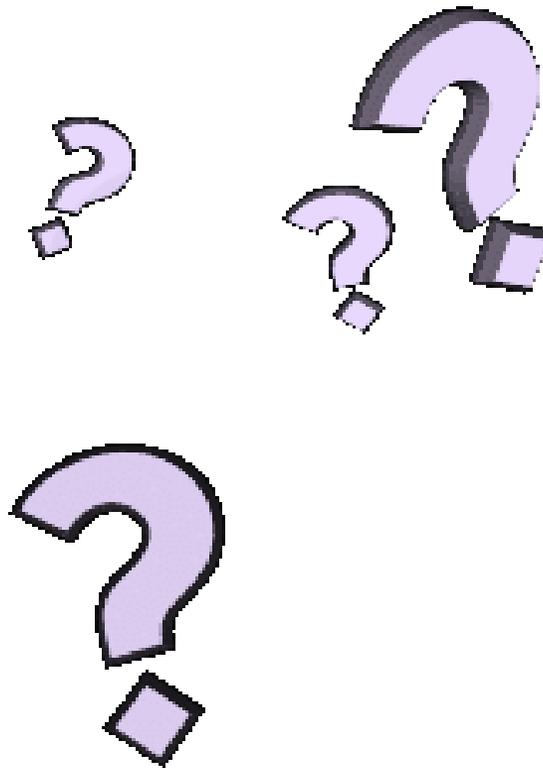
- ❑ Dans ce cas d'étude le Smart PS a le potentiel de tirer partie de la durabilité. Il apparaît comme un puissant moteur environnemental
- ❑ M3 Upgradable est la meilleure solution (éco-environnement) pour toutes les parties prenantes.
- ❑ L'approche fournit une présente une méthodologie d'ACV adaptée pour évaluer les avantages environnementaux de différentes offres de PSS intelligents, y compris les systèmes TIC, l'éco-conception, les modes de mise à niveau et l'analyse d'incertitude.
- ❑ L'approche de aide à la décision (multicritères multi-acteurs) dans le contexte du PSS
- ❑ Cette étude présente deux limites principales en ce qui concerne son application dans le contexte des PSS intelligents : (i) la numérisation évolue constamment, de sorte que les résultats de l'étude ne sont que temporaires ; (ii) l'analyse de l'incertitude est limitée par une absence d'intégration de certains composants du système intelligent.
- ❑ Perspective de recherche : l'évaluation de scénarios basée sur le profil de l'utilisateur pourrait être étudiée dans le cadre de recherches futures.

## References

- Beuren, F.H., Gomes Ferreira, M.G., Cauchick Miguel, P.A. (2013). Product-service systems: a literature review on integrated products and services. *J. Clean. Prod.* 47, 222–231
- Doualle, B., Medini, K., Boucher, X., Laforest, V. (2015). Investigating sustainability assessment methods of product-service systems. *Procedia CIRP* 30, 161–166
- Kuhlenköttera, B., et al. (2017). New perspectives for generating smart PSS solutions – life cycle, methodologies and transformation. *Procedia CIRP* 64, 217–222 (2017)
- ISO. S (2006). ISO 14040, 2006. Environmental Management–Life Cycle Assessment–Principles and Framework. Int Organ Stand
- Muralikrishna, I.V., Manickam, V. (2017). Environmental Management
- ISO, S. (2018). 14067, 2018. Greenhouse gases. Carbon footprint of products. Requirements and guidelines for quantification.
- ISO. S (2013). ISO 18601, 2013. Packaging and the Environment—General Requirements for the Use of ISO Standards in the Field of Packaging and the Environment.
- Dal Lago, M., Corti, D., Wellsandt, S. (2017). Reinterpreting the LCA standard procedure for PSS. *Procedia CIRP* 64, 73–78
- Huijbregts, Mark AJ. (1998). Application of uncertainty and variability in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 3, 273-280.
- Björklund, A. E. (2002). Survey of approaches to improve reliability in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 7, 64-72.
- Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (2018). *Life cycle assessment*. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3> Book.
- Igos, E., Benetto, E., Meyer, R., Baustert, P., & Othoniel, B. (2019). How to treat uncertainties in life cycle assessment studies? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24, 794-807.



## Questions





Une école de l'IMT

**Thank you for your attention!**

UMR CNRS 6158 LIMOS

Ecole des mines de Saint-Etienne- I. Fayol  
1 58 cours Fauriel, Saint-Etienne, F42023

[mariza.maliqi@emse.fr](mailto:mariza.maliqi@emse.fr)



# Configuration d'une méthode ACV au smart PSS

## **Méthode éprouvée et déjà utilisée par elm Leblanc**

- ✓ Pour des systèmes technologiques
- ✓ Permettant une comparaison de solutions alternatives
- ✓ Prise en compte de certaines formes d'incertitudes
- ✓ Résultats caractérisant un système unitaire

## **Mais comment rendre cette méthodologie applicable à une offre intégrée produits-services?**

- ✓ Des systèmes technologiques + un ensemble de services
- ✓ Des technologies informatiques supportant les services (mutualisées...)
- ✓ Des sources d'incertitudes nouvelles et renforcées
- ✓ Des systèmes upgradables, permettant un changement des impacts en cours de cycle d'usage
- ✓ Des cycles d'usage multiples (et multi-acteurs) possibles

### **Enjeux de la recherche:**

- Mise au point d'une méthode ACV applicable au PSS
- Modelling and analysis of results for the balloon of the future

### Analyse du cycle de vie :

- i. proposer une méthode d'analyse du cycle de vie environnemental des Smart PSS

### Adaptation de la méthode ACV :

nous avons appliqué la même méthode à quatre scénarios différents envisagés

### Les analyses de sensibilité (dans l'analyse ACV) :

*il est nécessaire de considérer :*

- i. l'analyse de l'incertitude due aux hypothèses envisagées dans chaque scénario PSS;
- ii. après avoir examiné certaines hypothèses, la méthode expérimentale est structurée et cohérente;
- iii. de réaliser une ou plusieurs études de sensibilité pour affiner son interprétation;

### Mis à jour de la simulation économique

- i. adaptation de la simulation VBA-Excel réalisée par un thésard (mise à jour du contexte)

### Aide à la décision de la meilleure solution PSS (multicritères multi-acteurs):

*il est nécessaire de considérer :*

- i. nous avons construit une simulation (économique et environnementale)
- ii. nous avons adapté la méthode PROMETHEE II dans le contexte PSS

### Les résultats marquants de l'étude de cas:

- i. la phase d'utilisation a l'impact le plus important sur l'environnement ;
- ii. le scénario environnemental le plus important pris en compte est le scénario PSS Upgradable;
- iii. le meilleur solution (multicritères) pour l'ensemble des acteurs: M3- UP

# Contexte de recherche

## Motivation

- ❑ **Systeme produit-service (PSS) :** "Un système de produits, de services, de réseaux d'acteurs et d'infrastructures de soutien qui s'efforce en permanence d'être compétitif, de satisfaire les besoins des clients et d'avoir un impact environnemental plus faible que les modèles d'entreprise traditionnels." [Goedkoop et al, 1999]

À mesure que le producteur devient plus responsable de son produit, il doit renforcer sa capacité à coopérer avec les parties prenantes (employés, communautés locales, fournisseurs, etc.).

