



CONTRIBUTION À L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE :
AIDE À LA DÉCISION POUR LA RÉGÉNÉRATION D'UN PRODUIT
EN FONCTION DU CONTEXTE ET DE SON ÉTAT DE SANTÉ
UTILISATION DES RDP COLORÉS STOCHASTIQUES

Gautier VANSON, Pascale MARANGÉ et Éric LEVRAT



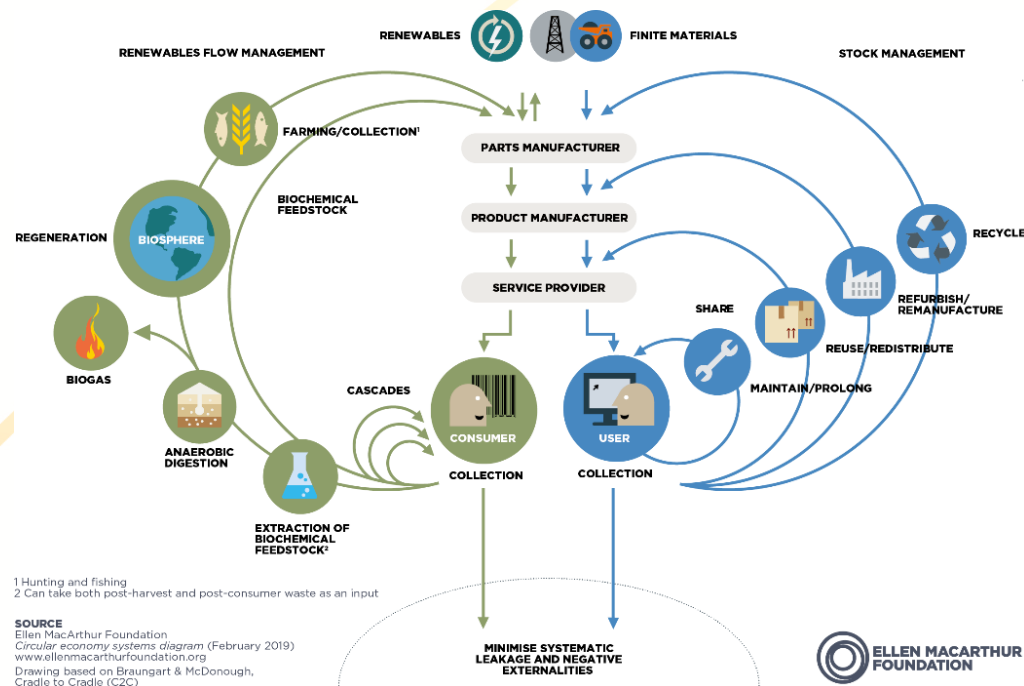
CONTEXTE



- C Changements climatiques / Augmentation de déchets
- C Pandémies et guerres pointent la dépendance des états à des ressources primaires non disponibles sur leurs territoires
- C Problèmes liés aux modes de consommation et de production : Un modèle de société non durable avec un impact fort sur la planète et ses habitants

UNE SOLUTION POSSIBLE : ECONOMIE CIRCULAIRE

- Les gouvernements mettent en place des lois pour inciter les entreprises à revaloriser leurs produits déjà vendus ... Mais ils ne disent pas comment faire
- Piste d'action choisie : Mise en œuvre de l'économie circulaire qui se focalise sur notre manière de produire, d'utiliser et de mieux revaloriser les produits à la fin de leur phase d'utilisation. 'Industrial systems that are restorative or regenerative by intention and design' (Ellen MacArthur Foundation, 2013)



CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUES DES TRAVAUX

C Besoins :

C **Concevoir un écosystème de régénération** pour rendre ce produit plus robuste, capable de durer plus longtemps, d'être maintenu et d'envisager plusieurs cycles d'usages.

C **Analyser tout au long du cycle de vie** de cet écosystème de régénération que l'impact est positif

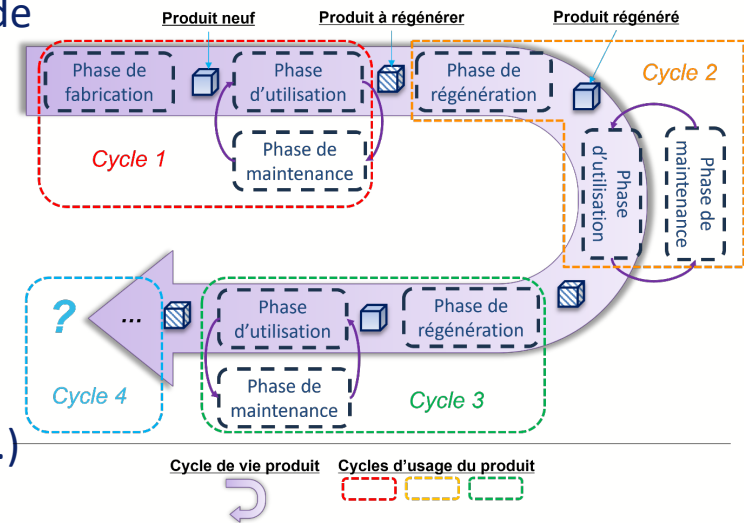
C Régénération n'est pas un processus de production classique et soulève les problématiques suivantes :

C **Spécificité du flux de produits** traités (déchets, flux non constants en quantité et qualité),

C **Spécificités des informations disponibles** pour prendre la décision (natures hétérogènes, incomplètes, incertaines, ...)

C **Effets escomptés de la régénération**, dépendant de l'état de santé du produit à la fin de son utilisation

C **Stratégie de régénération dépendante du contexte** (demande du marché, réglementation, sécurité...).



QUESTION DE RECHERCHE

- C Sachant qu'il existe plusieurs régénérateurs, comment fournir aux décideurs un moyen de choisir une trajectoire de régénération, intégrant les six **besoins de l'EC**, selon **l'état de santé du produit** en fin de vie et du **contexte** ?

- C **Hypothèses de recherche :**
 - C Produit à une forte valeur ajoutée
 - C Marché existant en produits régénérés (produits et pièces)
 - C Flux de produits à régénérer est important (produits complets)
 - C Régénération produit par produit
 - C Contrainte : favoriser la régénération du niveau le plus haut possible

CARACTÉRISATION TECHNIQUE DES RÉGÉNÉRATEURS

- C **Proposition** : Caractérisation technique basée sur le **flux entrant, sortant** et le **processus de régénération**, avec comme référence l'état de santé du produit neuf.
- C **L'état de santé produit** est représenté par le niveau de **satisfaction** de l'**ensemble des exigences** du produit (**ISO/IEC/IEEE 24748-4 : 2016**).

- C **Exigences fonctionnelles** :

- C Doit broyer les grains de café
- C Doit stocker de l'eau
- C Doit faire une percolation sous pression de l'eau et du café

- C **Exigences performance** :

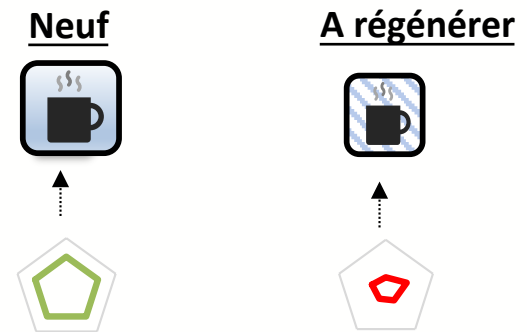
- C Doit fournir une pression de 15 bars
- C Doit fournir un café avec une densité de café supérieure à 70g pour 200ml

- C **Exigences interfaces** :

- C Doit s'interfacer avec l'utilisateur pour l'approvisionnement en eau
- C Doit s'interfacer avec l'utilisateur pour choisir un type café

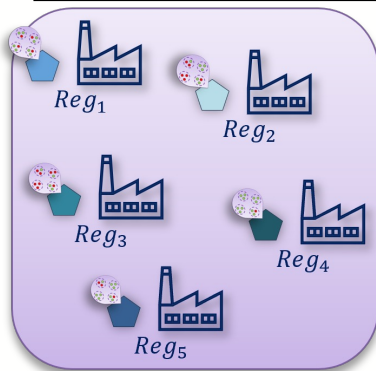
- C **Exigences Contraintes** :

- C Doit avoir une surface sans rayure
- C Doit avoir une surface propre

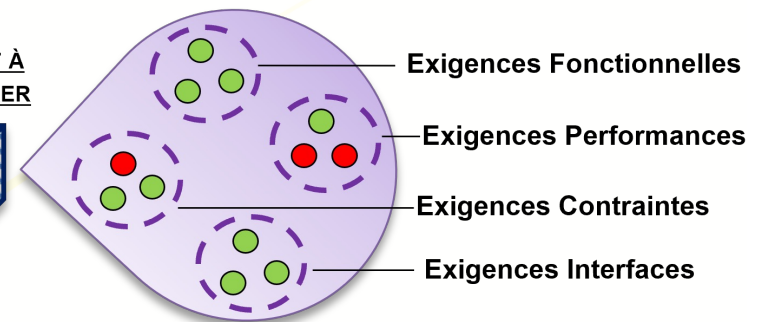


APPROCHE PROPOSÉE

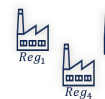
ÉTAT DE SANTÉ MINIMUM D'UN PRODUIT POUVANT ÊTRE RÉGÉNÉRÉ
POUR CHAQUE RÉGÉNÉRATEUR



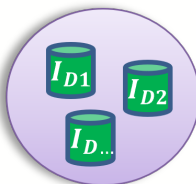
ÉTAT DE SANTÉ DU
PRODUIT À RÉGÉNÉRER



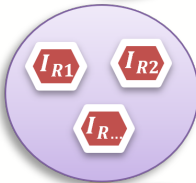
LES RÉG. CANDIDATS



INDICATEURS DU BESOIN DURABLE



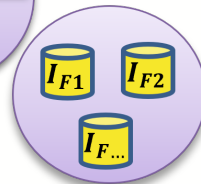
INDICATEURS DU BESOIN RESPONSABLE



INDICATEURS DU BESOIN GLOBAL



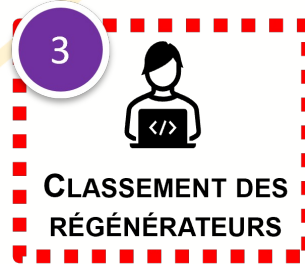
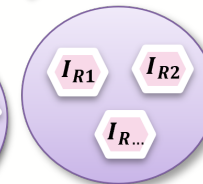
INDICATEURS DU BESOIN FRUGAL



INDICATEURS DU BESOIN ADAPTABLE



INDICATEURS DU BESOIN TRACABLE



Classement des régénérateurs	
1 ^{er}	Reg ₅
2 ^{ème}	Reg ₁
3 ^{ème}	Reg ₄

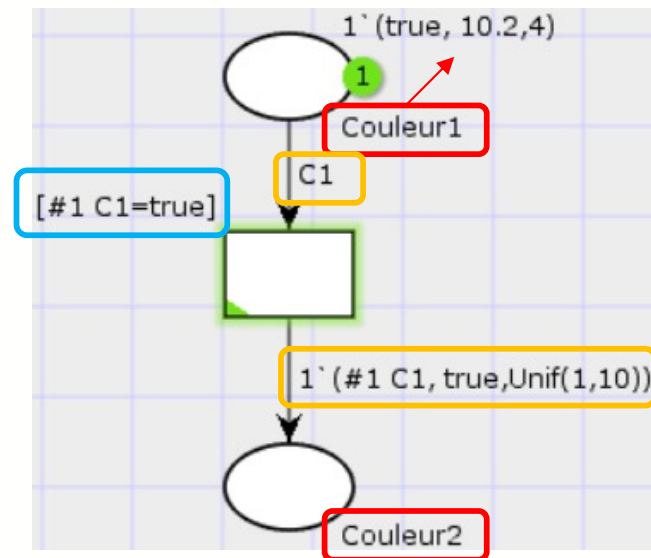
BESOINS DE MODÉLISATION

- C Certains indicateurs **dépendent de l'état de santé du produit** à régénérer et **des activités de régénération**, ce qui nécessite de **simuler** l'impact des régénérateurs sur l'état de santé produit.
 - C **Exemple d'indicateurs** : Quantité d'énergie / Probabilité de réussite

- C **Besoins de modélisation pour l'estimation des indicateurs** :
 - C Impact des régénérateurs sur l'état de santé d'un produit à régénérer.
 - C Modélisation de l'état de santé produit et des éléments de sa nomenclature
 - C Modélisation de la dynamique des régénérateurs
 - C Modélisation système à événements discrets : étapes du processus de régénération sur les états du produit
 - C Modélisation des indicateurs à estimer
 - C Prise en compte de l'incertitude des régénérateurs et de l'état de santé produit sur les indicateurs à estimer.
 - C Incertitude sur l'état de santé produit
 - C Incertitude sur le résultat des activités de régénération (risque d'échec)
 - C Utiliser une modélisation modulaire pour adapter le modèle à différentes situations.

FORMALISME DE LA MODÉLISATION

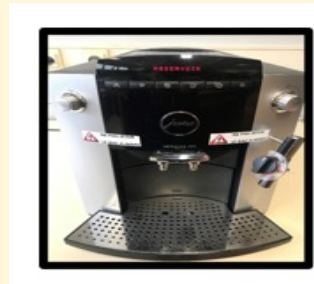
- C **Choix de l'outil de modélisation** : Les RdPC (Dutheillet and Haddad 1989)
 - C **RdP** : pour l'évolution du comportement des régénérateurs
 - C **Coloré** : pour la prise en compte de la modularité des états de santé et de la nomenclature et l'estimation des indicateurs
 - C **Stochastique** : pour la modélisation de l'incertitude
- C La définition formelle de a été utilisée dans nos travaux. Les RdPC sont définis comme un n-uplet $(\Sigma, P, T, A, N, C, G, E, I)$:
 - C Σ représente l'ensemble non vide de couleurs.
 - C P représente l'ensemble fini des places p_i .
 - C T représente l'ensemble fini des transitions t_j .
 - C A représente l'ensemble fini d'arcs a_k tel que $P \cap T = P \cap A = T \cap A = \emptyset$
 - C N représente la fonction des nœuds. Elle est définie de A vers $P \times T \cup T \times P$
 - C C représente la fonction de couleur de P vers Σ qui assigne une couleur à chaque place.



EXEMPLE DE MODÉLISATION

C Modélisation pour le régénérateur : réutilisation

C 1) Modélisation de l'état de santé de la machine à café :



9 exigences



1 variable
mesure la satisfaction
d'une exigence



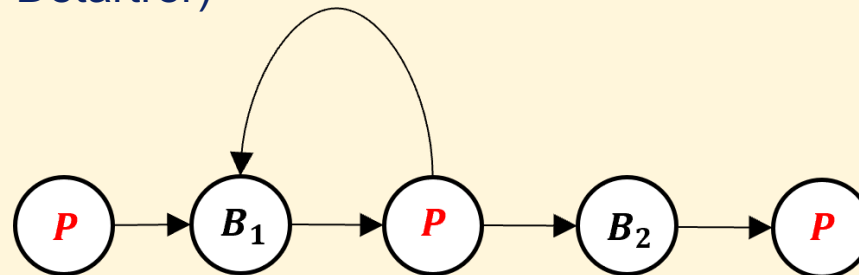
9 variables à
modéliser

▼ ModelisationEtatDeSante

```
▼ colset P = product BOOL * BOOL * BOOL * REAL * REAL * BOOL * BOOL * INT * INT;
```

C 2) Modélisation de la dynamique des régénérateurs

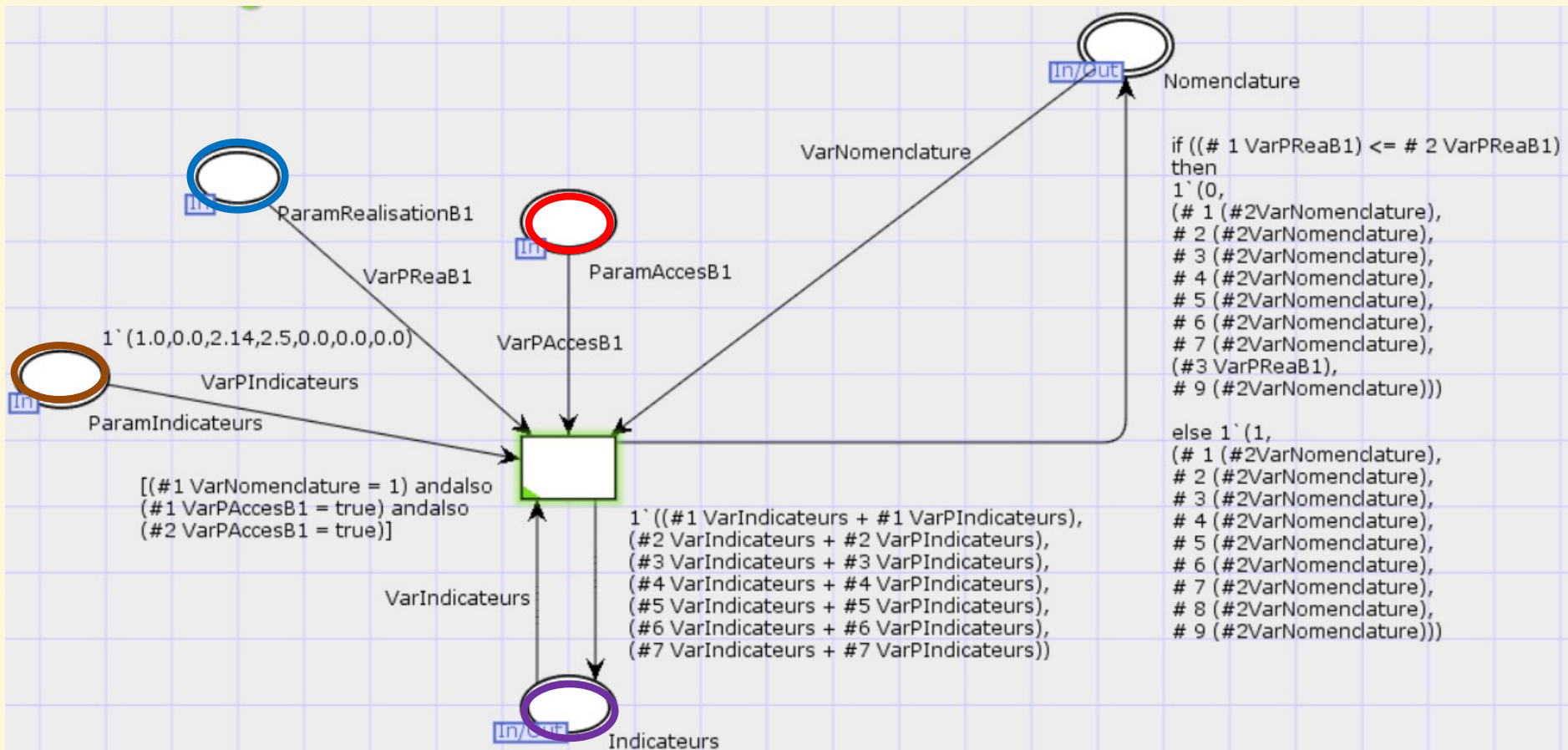
C **Etape 1** : Formaliser le processus de régénération en graphe AND / OR (B_1 Aspirer et B_2 Détartre)



C **Etape 2** : Traduire la modélisation graphique AND / OR en RdPC

MODÉLISATION D'UNE ACTIVITÉ

- Modélisation des ressources pour réaliser l'activité : (opérateurs, outils etc.)
- Modélisation de l'impact de l'activité et de l'incertitude de la revalorisation.
- Modélisation de l'impact de l'activité sur les indicateurs
- Modélisation des indicateurs à estimer



MODÉLISATION D'UNE ACTIVITÉ

C Modélisation des ressources pour réaliser l'activité : (opérateurs, outils etc.)

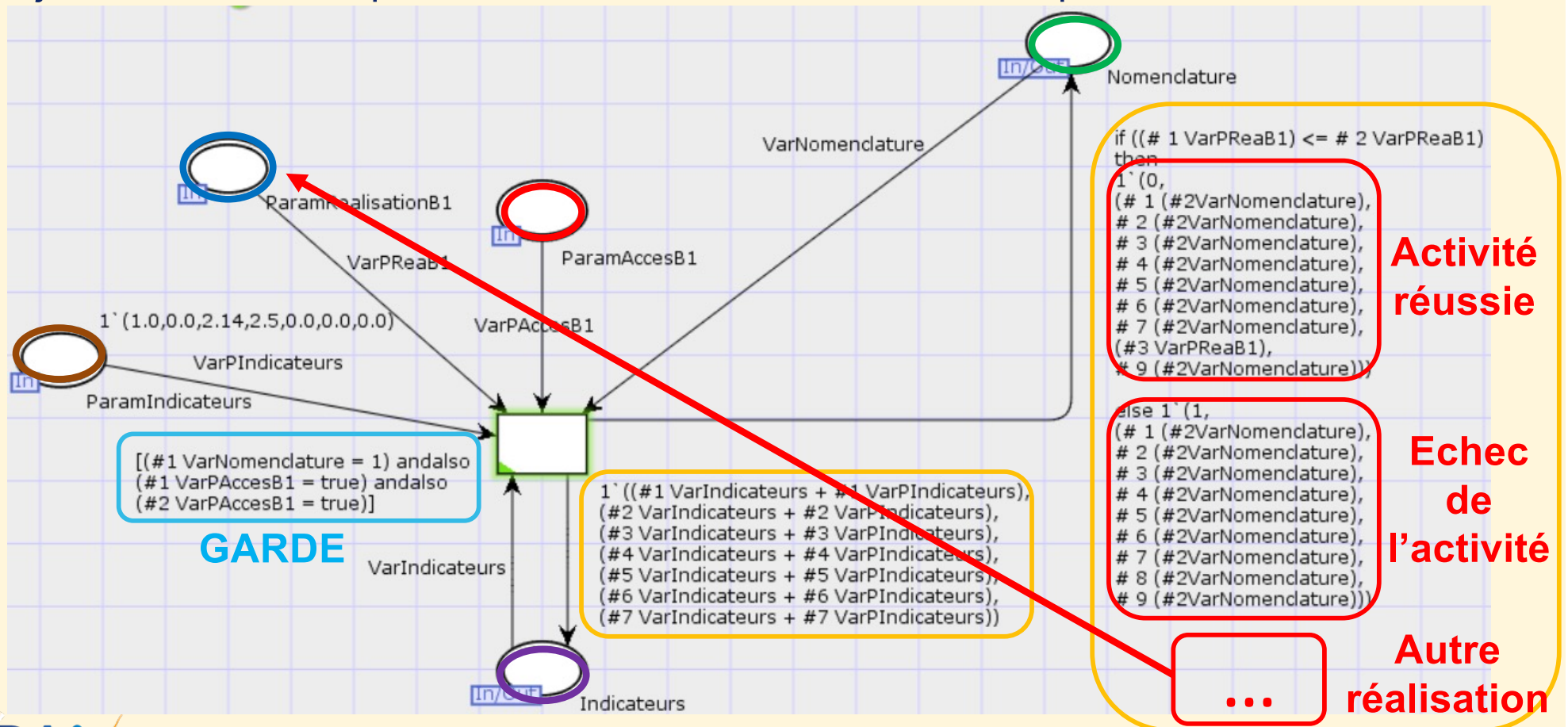
▼ ModelisationEtatDeSante

▼ colset P = product BOOL * BOOL * BOOL * REAL * REAL * BOOL * BOOL * INT * INT;

▼ colset Activite = INT;

▼ colset Nomenclature = product Activite * P; => l'état de santé + activité courante

C Ajout d'une couleur pour favoriser la modularité : **Activité** pour l'ordonnancement



MODÉLISATION D'UNE ACTIVITÉ

C Modélisation des ressources pour réaliser l'activité : (opérateurs, outils etc.)

▼ ModelisationEtatDeSante

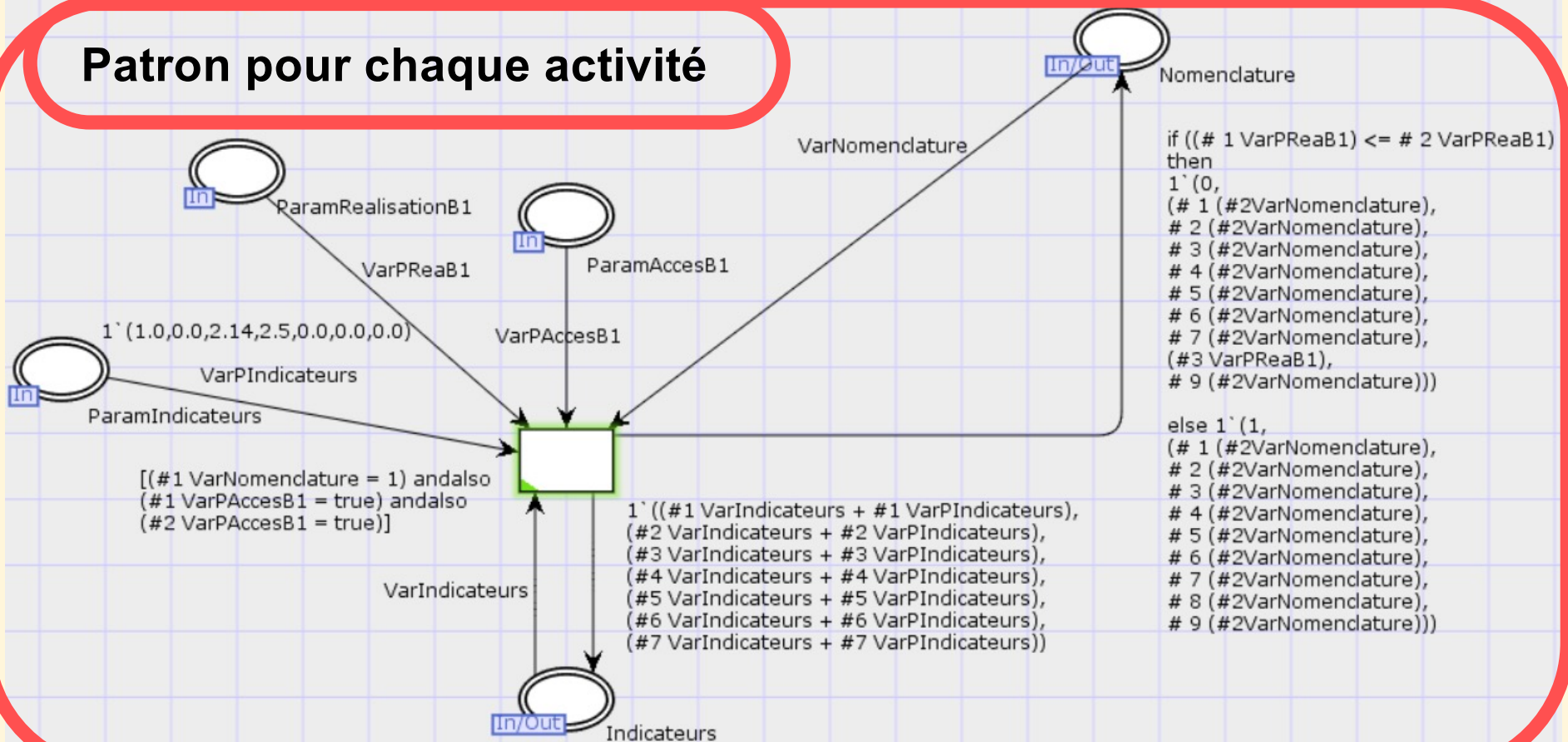
▼ colset P = product BOOL * BOOL * BOOL * REAL * REAL * BOOL * BOOL * INT * INT;

▼ colset Activite = INT;

▼ colset Nomenclature = product Activite * P; => l'état de santé + activité courante

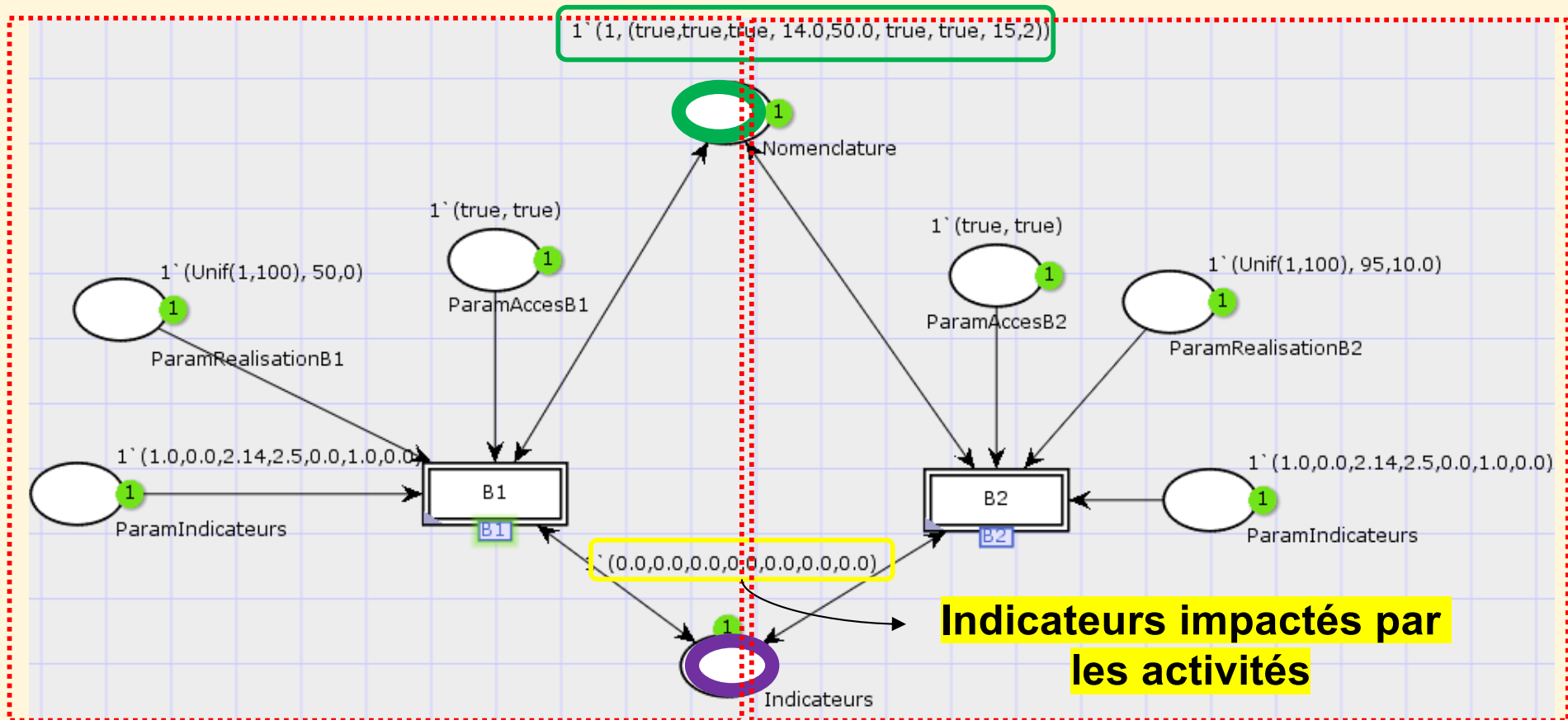
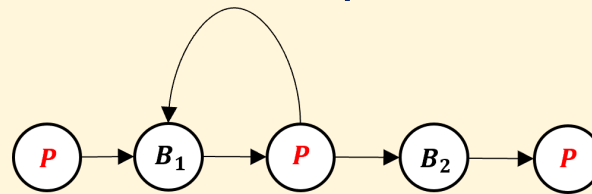
C Ajout d'une couleur pour favoriser la modularité : **Activité** pour l'ordonnancement

Patron pour chaque activité

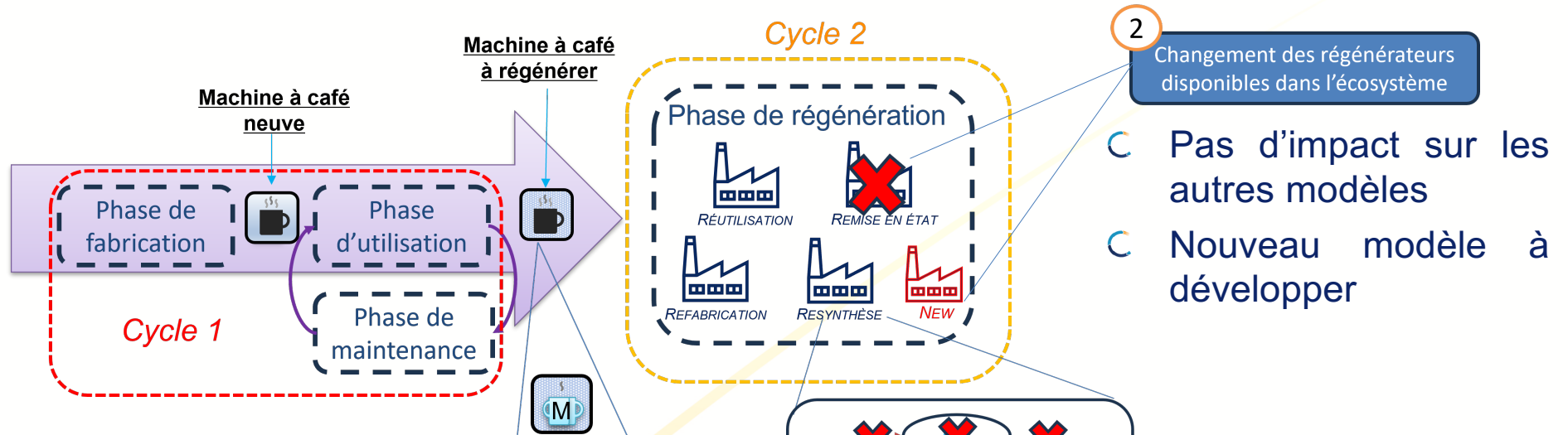


MODÉLISATION DU RÉGÉNÉRATEUR

C 2 instances du patron et fusion des places *Nomenclature* et *Indicateurs*



ADAPTABILITÉ DE LA MODÉLISATION

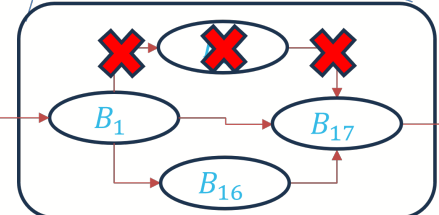


2 Changement des régénérateurs disponibles dans l'écosystème

- C Pas d'impact sur les autres modèles
- C Nouveau modèle à développer

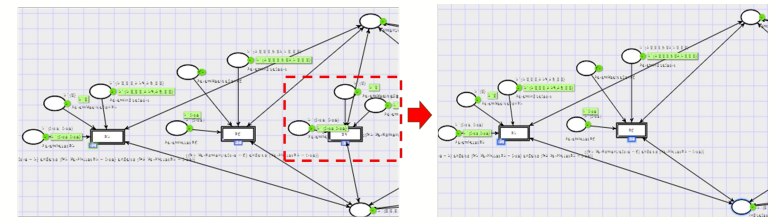
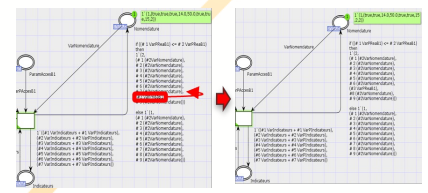
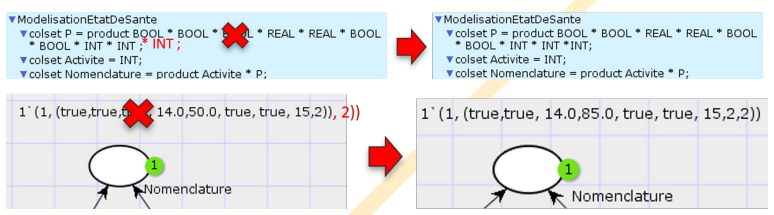
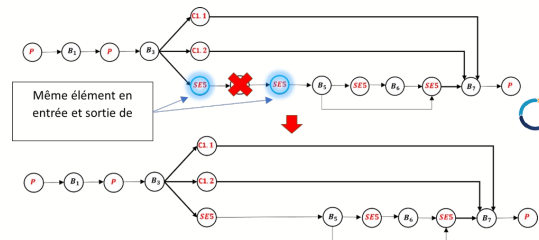
C Mise à jour des couleurs et des expressions d'arcs pour l'estimation de l'état de santé.

1 Changement de l'état de santé produit



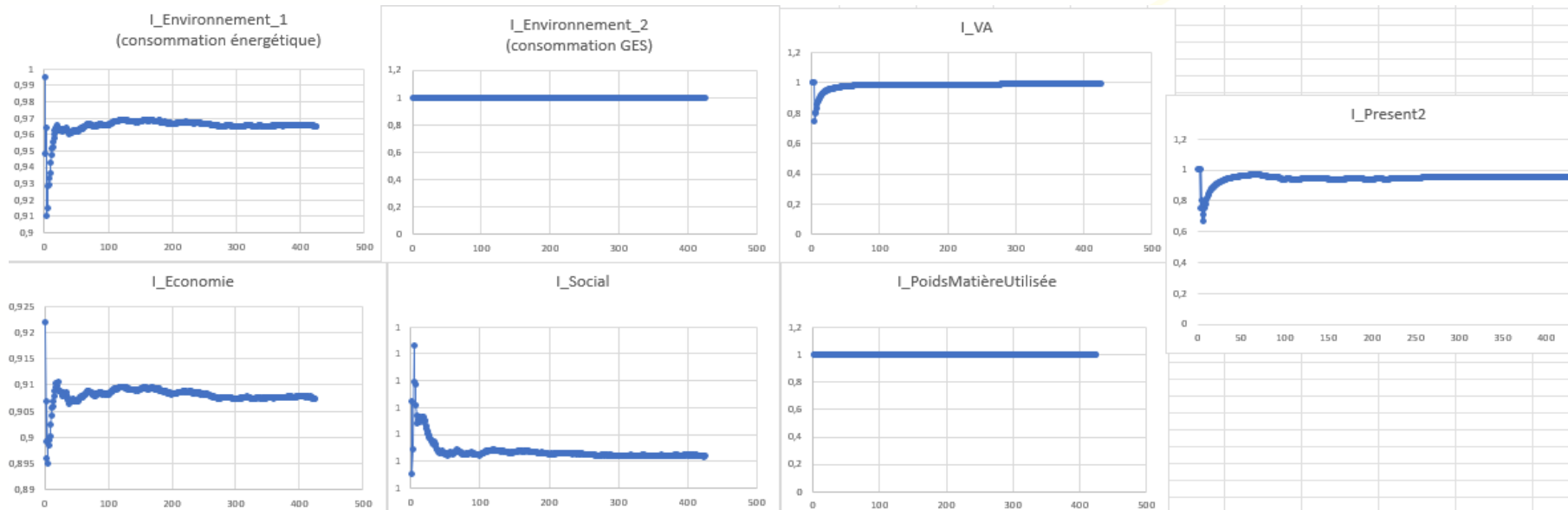
3 Changement dans le processus de régénération

C Vérifier la correspondance des entrées / sorties
C Mise à jour de l'ordonnancement



ESTIMATION DES INDICATEURS

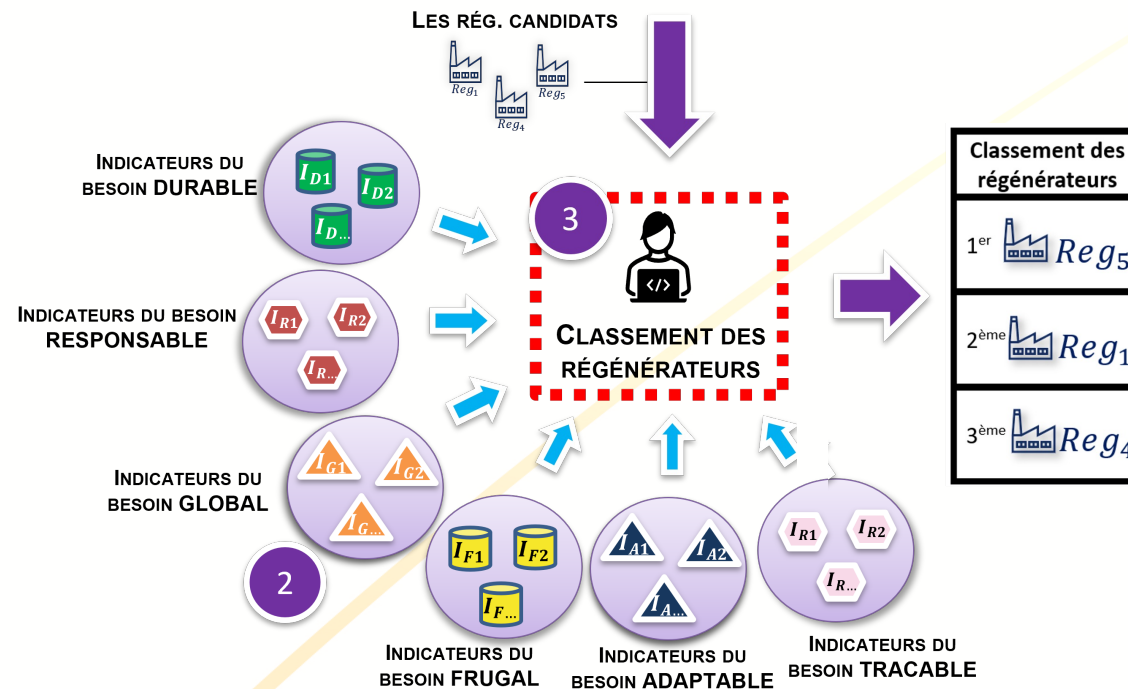
- **Proposition** : utilisation de la simulation de Monte Carlo (Metropolis and Ulam, 1949) pour estimer les indicateurs de l'EC.



- **2 critères d'arrêt pour arrêter la simulation des modèles :**

- 1) Attendre que tous les indicateurs convergent selon un écart type défini par le décideur.
- 2) Définir un nombre de simulations maximum.
 - Risque que certains indicateurs n'aient pas encore convergé donc valeurs d'indicateurs non déterministes

AIDE À LA DÉCISION POUR LE CLASSEMENT DES RÉGÉNÉRATEURS



C Pour montrer la faisabilité de nos contributions l'outil d'aide à la décision multicritères AHP a été choisi :

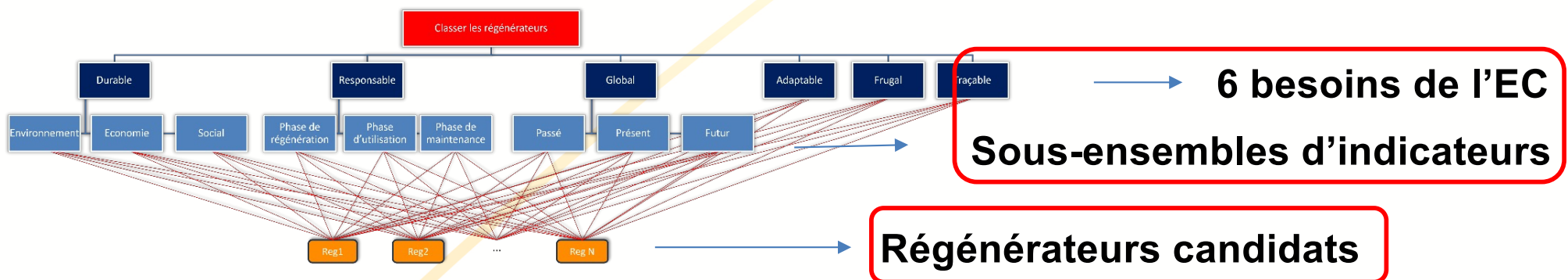
C Outil 'largement utilisé' et 'reconnu dans la littérature'

C Outil qui permet de considérer les **préférences** des décideurs (E. W. I. Cheng and Li, 2001) => capacité **d'adaptation** face aux changements de contexte.

PRÉSENTATION DE L'OUTIL AHP

C AHP : méthode en 7 phases (Vaidya and Kumar 2006)

- C Phase 1 : Énoncer le problème
- C Phase 2 : Elargir les objectifs du problème en identifiant les différents acteurs à considérer et les différents résultats possibles
- C Phase 3 : Identification des critères qui influencent la prise de décision
- C Phase 4 : Structurer le problème :



C Phase 5 : Définir les préférences pour chaque niveau de critère

- C Selon l'échelle fondamentale des nombres absolus (Saaty 2008)
- C Selon les caractéristiques techniques des régénérateurs

C Phase 6 : Vérifier la cohérence des préférences

C Phase 7 : Déterminer les scores des régénérateurs candidats

Intensity of importance	Definition	Explanation
1	Equal importance	Two activities contribute equally to the objective
2	Weak or slight	Experience and judgement slightly favour one activity over another
3	Moderate importance	Experience and judgement strongly favour one activity over another
4	Moderate plus	
5	Strong importance	Experience and judgement strongly favour one activity over another
6	Strong plus	
7	Very strong or demonstrated importance	An activity is favoured very strongly over another; its dominance demonstrated in practice
8	Very, very strong	
9	Extreme importance	The evidence favouring one activity over another is of the highest possible order of affirmation
Reciprocals of above	If activity i has one of the above non-zero numbers assigned to it when compared with activity j, then j has the reciprocal value when compared with i.	A reasonable assumption

APPLICATION POUR UNE MACHINE À CAFÉ

Une machine à café doit être régénérée :

Etape 1 : identification des régénérateurs candidats :

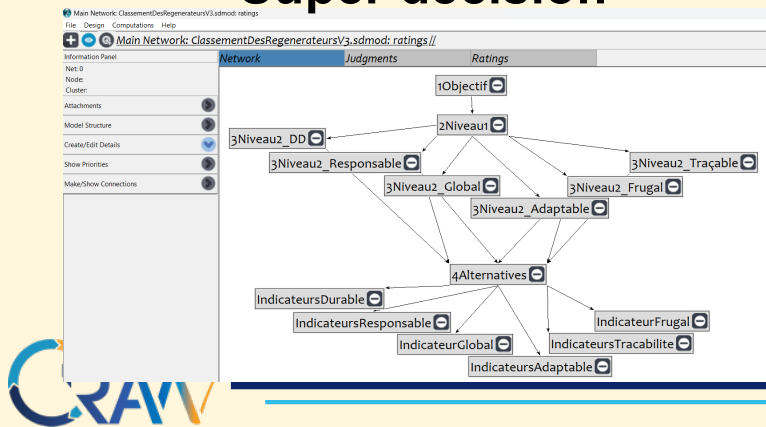
Réutilisation / Remise en état / Refabrication

Etape 2 : Classement des régénérateurs

1) estimations des indicateurs :

2) classement des régénérateurs avec l'outil :

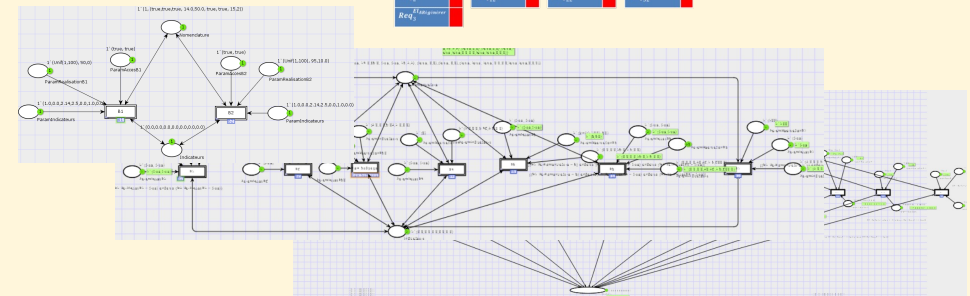
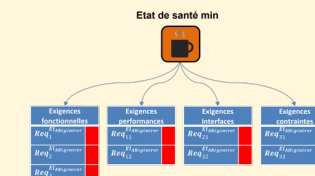
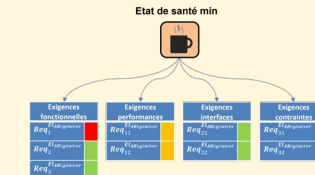
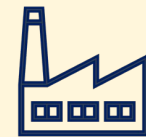
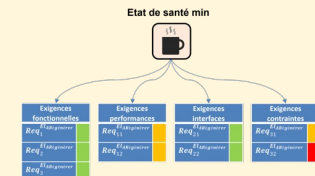
Super decision



Scores des régénérateurs

Name	Graphic	Normals
Refabrication		0.124793
RemiseEnEtat		0.305571
Reutilisation		0.491839

➔ Réutilisation



CONCLUSIONS

- C **Contribution générale** : Approfondissement de la solution de l'EC dans un contexte d'industrialisation de la régénération en considérant une vision holistique de l'EC.
- C Formalisation de l'état de santé produit et caractérisation des régénérateurs d'un point de vue technique
- C Utilisation d'un outil d'aide à la décision pour classer les trajectoires de régénération.

PERSPECTIVES

- C Faire un analyse de sensibilité par rapport au classement des régénérateur
- C Prioriser certains rég. ou activités qui permettent de conserver les ressources rares
- C Conception et évolution d'un écosystème de régénération (ANR RegEcoS)



CONTRIBUTION À L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE :
AIDE À LA DÉCISION POUR LA RÉGÉNÉRATION D'UN PRODUIT
EN FONCTION DU CONTEXTE ET DE SON ÉTAT DE SANTÉ
UTILISATION DES RDP COLORÉS STOCHASTIQUES

Gautier VANSON, Éric LEVRAT &
Pascale MARANGÉ

