

Ecologie industrielle et économie circulaire GI-4-S2-EC-EIE 13.&14. Désassemblage

Objectifs des 2 prochaines séances

- Comprendre le désassemblage
 - faire le lien entre l'assemblage et le désassemblage
 - comprendre les étapes du désassemblage
 - savoir planifier un désassemblage sélectif
 - (Séance 14) prendre en considération la variabilité dans les coûts, l'état des composants et la disponibilité
 - savoir prendre en compte la variabilité via les scénarios
 - distinguer entre les types de variabilités
- Comme le reste d'EIE, but $\neq$ exercice de RO
= **montrer que vous avez déjà des outils pour circulariser les flux dans un sys. de production**

Définition du désassemblage

- Le démontage est l'**extraction** des composants/pièces et matériaux **utiles** des produits en fin de vie grâce à une **série d'opérations** présentant les avantages suivants :
 - Le démontage permet le recyclage des ressources des produits en fin de vie ;
 - Certains composants peuvent être réutilisés ;
 - Le démontage peut éliminer les pièces contenant des substances nocives, par exemple des polluants environnementaux.
- La **conception du produit** et l'**assemblage** sont importants pour le désassemblage :
 - Le désassemblage peut être effectué s'il a été pensé au moment de l'assemblage
 - La conception du produit peut accélérer ou complètement annuler le désassemblage

=> Ecoconception dont le point d'entrée est l'ACV

Guo, Xiwang, MengChu Zhou, Abdullah Abusorrah, Fahad Alsokhry, and Khaled Sedraoui. "Disassembly sequence planning: a survey." *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica* 8, no. 7 (2020): 1308-1324.

Types de désassemblage

- Désassemblage total**
 - Le produit est totalement désassemblé en plusieurs composants
 - Ce type n'est pas toujours économiquement viable pour des raisons de coûts, de temps et de risques
- Désassemblage sélectif**
 - Certains composants sont sélectionnés pour être désassemblés du produit
 - Les autres composants sont souvent recyclés ou jetés
 - En fonction des produits, les critères de sélection peuvent être : coût, temps, demande, etc.

Lambert, A. J. D. (1999). Linear programming in disassembly/clustering sequence generation. *Computers & Industrial Engineering*, 36(4), 723-738.

Qu'est-ce qu'un bon désassemblage ↔ Lien avec l'assemblage

- Pour **réduire les impacts économiques et environnementaux** :
 - Faire le désassemblage en **temps minimum** / charge minimale
 - Regrouper** les composants ensemble
 - Limitier la variabilité des produits en fin de vie** pour bien prédire les procédures de désassemblage
 - Éviter** les matériaux/composants **dangereux**
 - À l'assemblage, tout composant de valeur, réutilisable ou dangereux doit être **facile à extraire** pour éviter de perdre du temps pendant le désassemblage
- Avoir une durée prédictible** des composants en fin de vie

Pourquoi le désassemblage ?

- Les possibilités de récupération de la valeur d'un produit

Possibilité	But	Niveau de désassemblage	Résultat / Impact
Réparation	Rendre le produit fonctionnel	Produit (désassemblage limité)	Quelques composants réparés
Reconditionnement	Améliorer la qualité, pas forcément comme neuf	Composant (peut être mise à jour)	Quelques composants réparés ou remplacés
Refabrication (remanufacturing)	Rendre neuf	Composant / Sous-composant	Composants réutilisés, recyclés, jetés
Recyclage	Réutilisation des matériaux	Matériaux	Matériaux utilisés dans d'autres produits

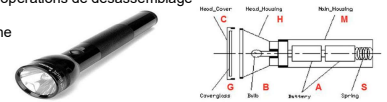
Étapes du désassemblage

- Analyse du produit**
 - Déterminer la valeur du produit après désassemblage
 - La valeur comprend : possibilité de réutilisation du produit / des composants, risques du désassemblage, durée de vie après désassemblage, etc.
- Analyse de l'assemblage**
 - Le plan d'assemblage est essentiel pour le désassemblage
 - L'analyse déterminera : les outils nécessaires, le temps et les compétences nécessaires, connaissances des composants pour maximiser la valeur, etc.
- Analyse de l'utilisation et de l'état du produit / des composants**
 - Déterminer la valeur de chaque composant / sous-composant après désassemblage
 - État de fonctionnement après désassemblage
 - Quelle filière pour la maximisation de la valeur du composant / sous-composant

→ **Besoin de bien gérer les opérations de désassemblage pour maximiser la valeur récupérée**

Selective disassembly sequencing problem

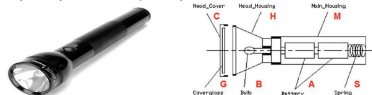
- Objectif :
 - Trouver les meilleures séquences pour désassembler un produit et obtenir les composants souhaités
 - Minimiser le coût des opérations
- Contraintes
 - Respecter les précédences entre les opérations de désassemblage
- Cas d'étude : désassemblage d'une torche



Kim, H. W., Park, C., & Lee, D. H. (2018). Selective disassembly sequencing with random operation times in parallel disassembly environment. *International Journal of Production Research*, 56(24), 7243-7257.

Selective disassembly sequencing problem

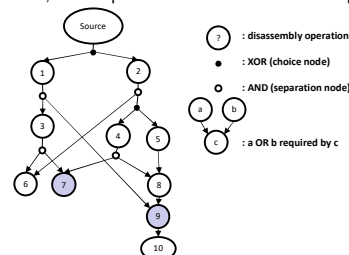
- Exercices :
 - Exercice 8 : trouver les séquences qui minimisent le coût dans le cas déterministe
 - Exercice 9 : les temps de désassemblage étant aléatoires (dépendants de l'opérateur), trouver les meilleures séquences dans un temps souhaité
- Exercice basé sur l'étude de Kim *et al.* (2018), mais simplifié (Exercice 8.xlsx disponible sur Moodle).



Kim, H. W., Park, C., & Lee, D. H. (2018). Selective disassembly sequencing with random operation times in parallel disassembly environment. *International Journal of Production Research*, 56(24), 7243-7257.

Graphe de précédences entre les opérations

Pour notre exercice, les composants souhaités sont obtenus par les opérations 7 et 9 :



Kim, H. W., Park, C., & Lee, D. H. (2018). Selective disassembly sequencing with random operation times in parallel disassembly environment. *International Journal of Production Research*, 56(24), 7243-7257.

Modèle mathématique

- N : set of nodes in the extended process graph, $i, j, k \in N$
 A : set of arcs in the extended process graph, $(i, j) \in A$
 T : set of target components, $t \in T$
 OR : set of choice nodes
 or_{ij} : representation of OR, i.e. $or_{ij} = 1$ and $or_{ik} = 1$ iff you can do j XOR k after i , but not j and k together
 c_{ij} : disassembly cost for operation j immediately after performing operation i , i.e. sum of the corresponding sequence-dependent set-up and operation costs that satisfies the triangular inequality, i.e. $c_{ij} \leq c_{ik} + c_{kj}$ for all $k \neq i, j$
 PR_{ij} : =1 if disassembly operation j must be done immediately after disassembly operation i , and 0 otherwise

Decision variables

- x_{ij} : = 1 if disassembly operation j is performed immediately after operation i , and 0 otherwise
 y_i : = 1 if disassembly operation i is performed, and 0 otherwise

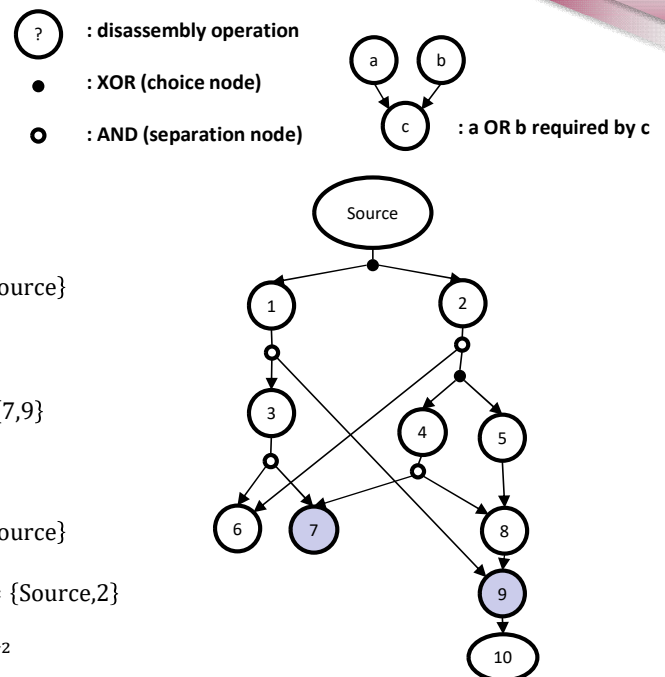
Kim, H. W., Park, C., & Lee, D. H. (2018). Selective disassembly sequencing with random operation times in parallel disassembly environment. International Journal of Production Research, 56(24), 7243-7257.

Modèle mathématique

Minimiser le coût total : $Minimise z = \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} \cdot x_{ij}$

Sujet à :

- Conservation du flux entrant : $\sum_{i \in N} x_{ij} \geq y_j \quad \forall j \in N \setminus \{Source\}$
- Conservation du flux sortant : $\sum_{j \in N} x_{ij} \leq M \cdot y_i \quad \forall i \in N$
- Opérations cibles : $y_j \geq 1 \quad \forall j \in T = \{7, 9\}$
- Boucle interdite : $x_{ii} = 0 \quad \forall i \in N$
- Relation de précédence : $\sum_{i \in N} PR_{ij} \cdot x_{ij} \geq y_j \quad \forall j \in N \setminus \{Source\}$
- XOR sur choice nodes : $\sum_j or_{ij} \cdot y_j \leq 1 \quad \forall i \in OR = \{Source, 2\}$
- Variables binaires : $x_{ij} \in \{0, 1\}, y_j \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in N^2$



Kim, H. W., Park, C., & Lee, D. H. (2018). Selective disassembly sequencing with random operation times in parallel disassembly environment. International Journal of Production Research, 56(24), 7243-7257.

Version alternative : Voir le problème comme un TSP où on ne visiterait que les nœuds « utiles »

On adapte un modèle connu à un nouveau problème introduit par l'économie circulaire

Un TSP facile à implémenter dans Excel (mais qui n'inclut pas toutes les caractéristiques du problème...):

- Min. $\sum_{(i,j) \in A} c_{ij} \cdot x_{ij}$ (12)
- s.t. $\sum_{i \in N} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N$ (13)
- $\sum_{j \in N} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N$ (14)
- $U_i - U_j + |N| \cdot x_{ij} \leq |N| - 1$ (15)

(15) est la contrainte d'élimination des sous-tours MTZ (Miller, Tucker, Zemlin) dans laquelle une variable de décision supplémentaire U_j compte le nombre de nœuds traversés par la route/

Dans ce modèle, tous les nœuds de N sont visités exactement une fois.

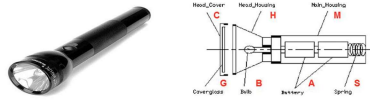
Pour adapter ce TSP au désassemblage, l'idée est de permettre au Solveur de ne pas visiter certains nœuds :

- On laisse « = 1 » dans (13) pour les j dans T (ensemble des Targets à visiter)
- Si non, remplacer par « ≤ 1 »
- Idem pour (14), mais pour les i .
- La matrice des distances doit :
 - avoir un coût de zéro de Sink vers Source
 - avoir un coût « (en pratique, 9999) pour les arcs impossibles

A faire : Notre modèle n'a que des coûts. Il faudrait ajouter le gain de visiter chaque nœud, puis modifier le modèle pour qu'il maximise le bénéfice (donc, retirer l'ensemble T pour que le Solveur décide quels nœuds sont à visiter).

Selective disassembly sequencing problem

- Exercices :
 - Exercice 8 : trouver les séquences qui minimisent le coût dans le cas déterministe
 - Exercice 9 : les temps de désassemblage étant aléatoires (dépendants de l'opérateur), trouver les meilleures séquences dans un temps souhaité
- Exercice basé sur l'étude de Kim *et al.* (2018), mais simplifié (Exercice 9.xlsx disponible sur Moodle).



Kim, H. W., Park, C., & Lee, D. H. (2018). Selective disassembly sequencing with random operation times in parallel disassembly environment. *International Journal of Production Research*, 56(24), 7243-7257.

INSA

14

Que se passe-t-il si les coûts dépendent des temps de désassemblage ?

- Les coûts de désassemblage dépendent souvent des temps opératoires (souvent manuels)
- Comment prendre en considération la variabilité des coûts ?
- Modifier la fonction objectif → Calculer une espérance mathématique
- Pour notre problème :
 - Les coûts sont stochastiques (tirés avec une loi uniforme) ($c_{ij} \in [lb, ub]$)
 - L'intervalle de coût représente le coût du travail manuel
 - Chaque valeur est choisie aléatoirement (scénario ω)
 - La fonction objectif devient :

$$\text{Minimise } z = \frac{1}{|\Omega|} \sum_{\omega \in \Omega} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij}(\omega) \cdot x_{ij}$$

INSA

15

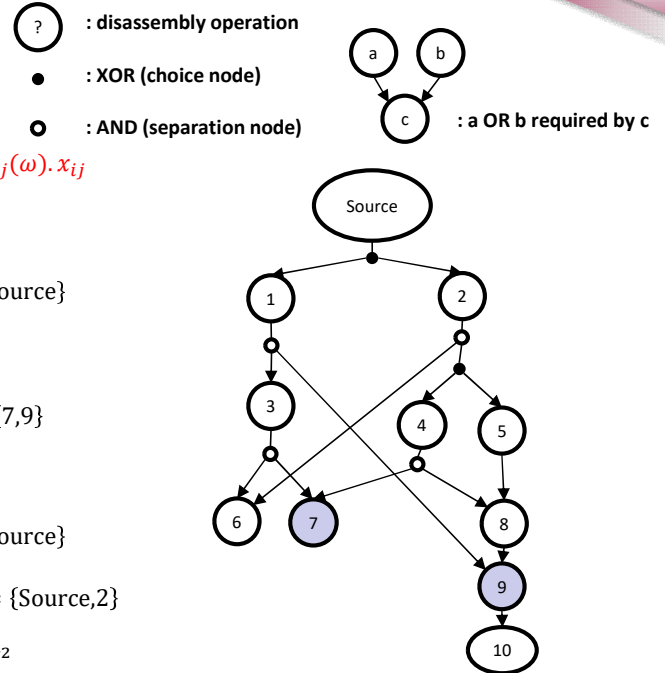
Le nouveau modèle mathématique

Minimiser le coût total :

$$\text{Minimise } z = \frac{1}{|\Omega|} \sum_{\omega \in \Omega} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij}(\omega) \cdot x_{ij}$$

Sujet à :

- Conservation du flux entrant : $\sum_{i \in N} x_{ij} \geq y_j \quad \forall j \in N \setminus \{\text{Source}\}$
- Conservation du flux sortant : $\sum_{j \in N} x_{ij} \leq M \cdot y_i \quad \forall i \in N$
- Opérations cibles : $y_j \geq 1 \quad \forall j \in T = \{7, 9\}$
- Boucle interdite : $x_{ii} = 0 \quad \forall i \in N$
- Relation de précédence : $\sum_{i \in N} PR_{ij} \cdot x_{ij} \geq y_j \quad \forall j \in N \setminus \{\text{Source}\}$
- XOR sur choice nodes : $\sum_j or_{ij} \cdot y_j \leq 1 \quad \forall i \in OR = \{\text{Source}, 2\}$
- Variables binaires : $x_{ij} \in \{0, 1\}, y_j \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in N^2$



Kim, H. W., Park, C., & Lee, D. H. (2018). Selective disassembly sequencing with random operation times in parallel disassembly environment. *International Journal of Production Research*, 56(24), 7243-7257.

INSA

INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
LYON

16

UNIVERSITÉ
DE LYON

Sur Excel

- Partir du fichier Exercice 9.xlsx sur moodle.
- Générer plusieurs scénarios (matrices de coûts) dans les intervalles en utilisant la fonction `RANDBETWEEN()` (`ALEA.ENTRE.BORNES()` en français)
- Pour chaque scénario (matrice), créer une fonction qui permet de calculer la somme des coûts
- La fonction objectif du nouveau modèle est la moyenne de toutes les fonctions de tous les scénarios
- Résoudre le nouveau modèle avec la nouvelle fonction objectif, avec :
 - 5 scénarios
 - 10 scénarios
 - 20 scénarios
- À partir de quel nombre de scénarios on atteint une convergence (une moyenne des coûts qui ne change quasiment pas même si on ajoute plus scénarios) ?
- Que se passe-t-il si les opérations cibles sont 7, 8 et 10 ?

INSA

INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
LYON

17

UNIVERSITÉ
DE LYON