

**INSA** INSTITUT NATIONAL  
DES SCIENCES  
APPLIQUÉES  
LYON

**Ecologie industrielle et économie circulaire**  
**GI-4-S2-EC-EIE** **2023-24**  
**11.&12. 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 12) 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

## 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 :
  - Il peut réaliser le recyclage des ressources des produits en fin de vie ;
  - certains composants peuvent être réutilisés ;
  - il 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

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 **environnementales** :
  - Faire le désassemblage en **temps minimum** / charge minimum
  - **Regrouper** les composants ensemble
  - **Limiter 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

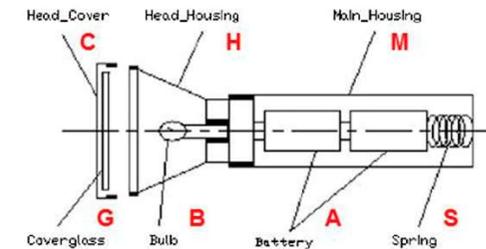
---

- **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

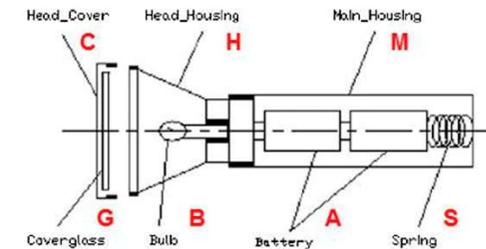
- Objectif :
  - Trouver les meilleures séquences pour désassembler un produit et obtenir les composants souhaités
  - Minimiser le coût des opérations
- Contraintes
  - Respecter les précédences entre les opérations de désassemblage
- Cas d'étude : désassemblage d'une torche



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

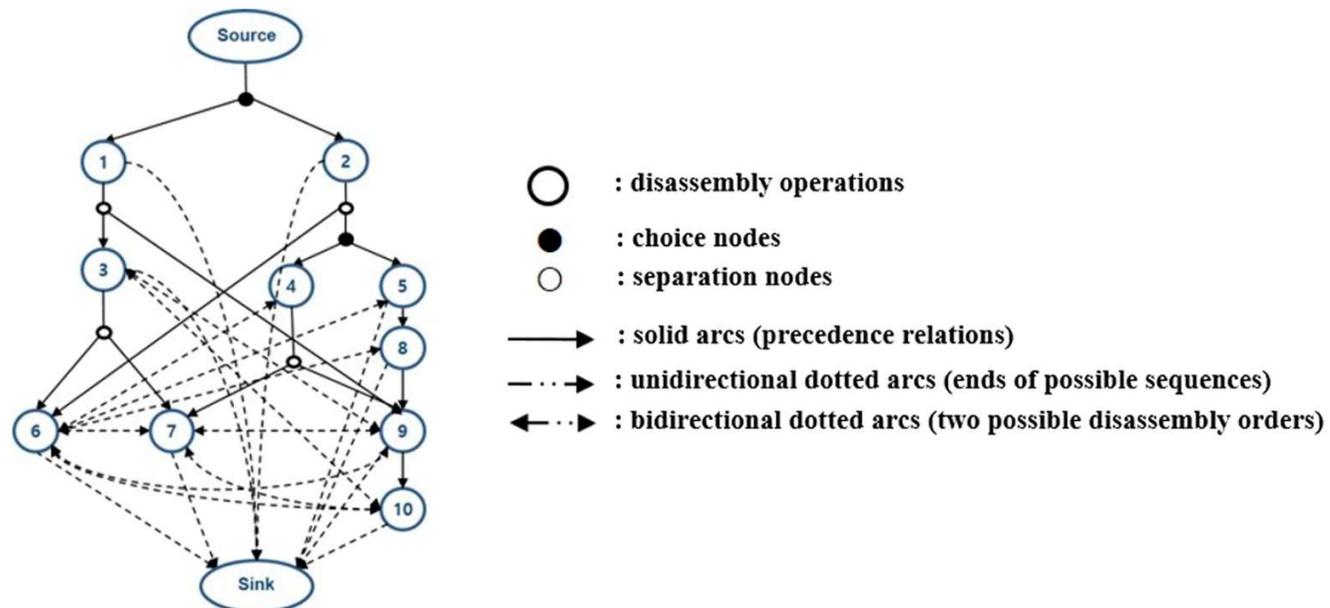
- Exercices :
  - Exercice 1 : trouver les séquences qui minimisent le coût dans le cas déterministe
  - Exercice 2 : les temps de désassemblage étant aléatoires (dépendants de l'opérateur), trouver les meilleures séquences dans un temps souhaité
- Utiliser l'étude de Kim et al. 2018 comme un exemple (étude 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 exemple, les composants souhaités sont obtenus avec 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  
 $c_{ij}$  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  $k \neq i, j$

### 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  
 $z_{ij}$  = 1 if disassembly operation  $j$  is performed after operation  $i$ , 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

$$\sum_{i \in N} x_{ij} = y_j \quad \text{for all } j \in N \quad (1)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = y_i \quad \text{for all } i \in N \quad (2)$$

$$y_t = 1 \quad \text{for all } t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} PR_{ij} \cdot y_i \geq y_j \quad \text{for all } j \in N \quad (4)$$

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

$$\sum_{j \in OR} y_j \leq y_k \quad \text{where } k \text{ is a direct predecessor of } j \quad (5)$$

$$PR_{ij} \cdot z_{ji} = 0 \quad \text{where } PR_{ij} = 1 \text{ for all } i, j \in N \quad (6)$$

$$z_{ij} + z_{ji} = 1 \quad \text{where } i \neq j, \text{ for all } i, j \in N \setminus \{0\} \quad (7)$$

$$z_{ij} + z_{jk} - z_{ik} \leq 1 \quad \text{for all } i \in N \text{ and } j, k \in N \setminus \{0\} \quad (8)$$

$$z_{ij} - x_{ij} \geq 0 \quad \text{for all } i, j \in N \quad (9)$$

$$x_{ii} = 0 \quad \text{for all } i \in N \quad (10)$$

$$x_{ij}, y_i, z_{ij} \in \{0, 1\} \quad \text{for all } i, j \in N \quad (11)$$

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 facilement implémentable dans Excel (mais loin d'être la meilleure formulation du problème...) :

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

- (15) est la contrainte d'élimination des sous-tours MTZ (Miller, Tucker, Zemlin) dans laquelle une variable de décision additionnelle  $U_i$  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)  
Sinon, remplacer par «  $\leq 1$  »
- Idem pour (14), mais pour les  $i$ .
- La matrice des distances doit :
  - avoir un coût de zéro de Sink vers Source
  - avoir un coût  $\infty$  (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).