

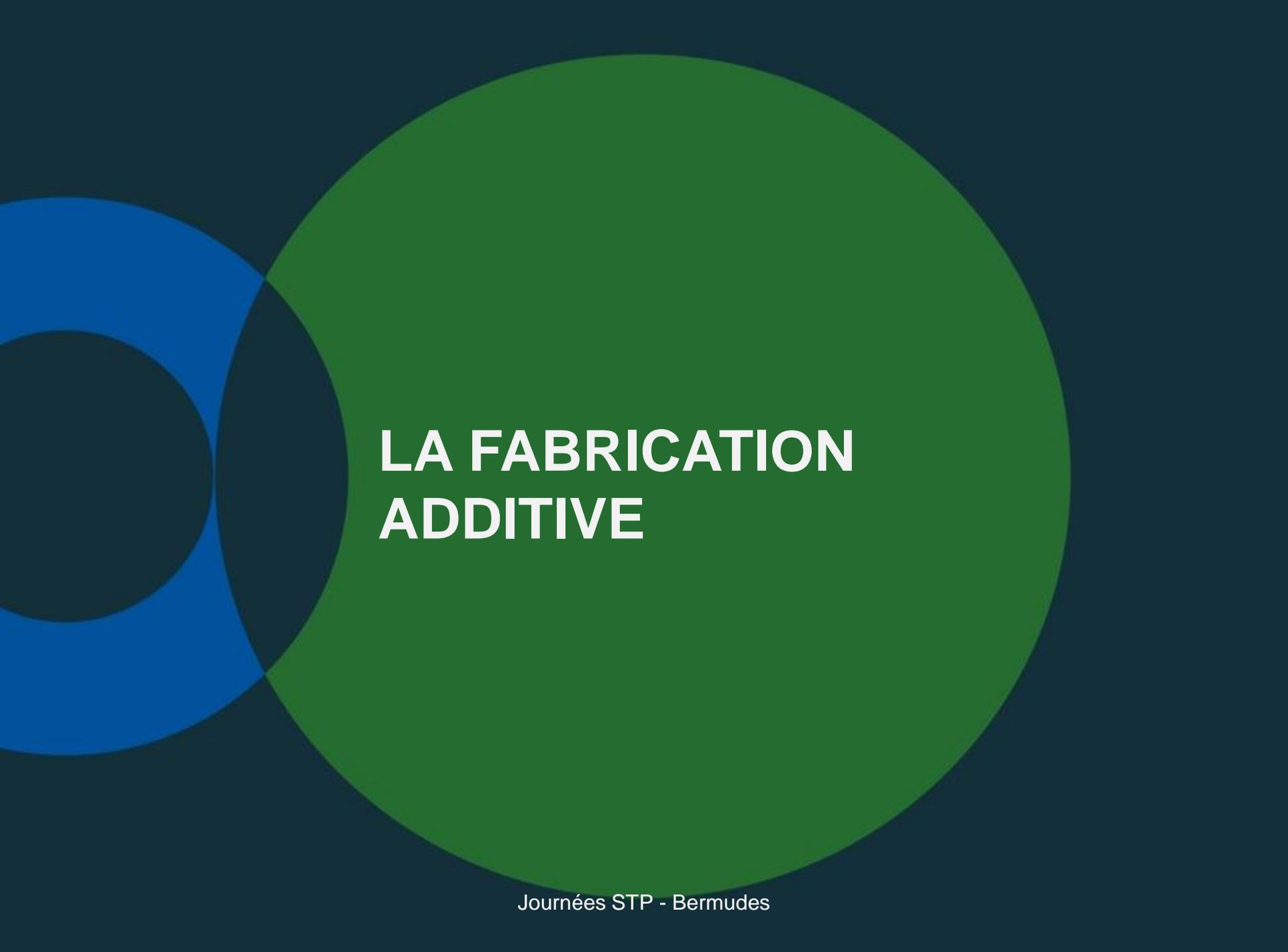


L'ordonnancement en fabrication additive

Anne-Lise Antomarchi

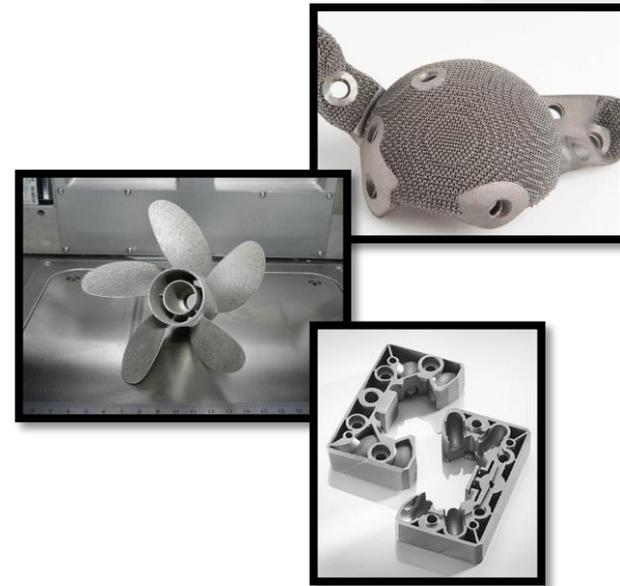
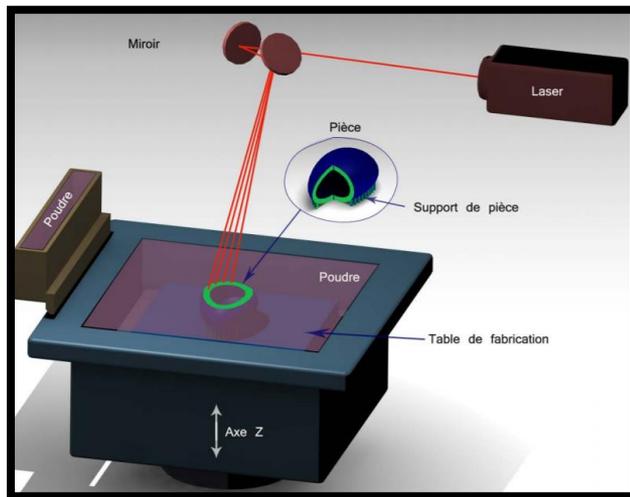
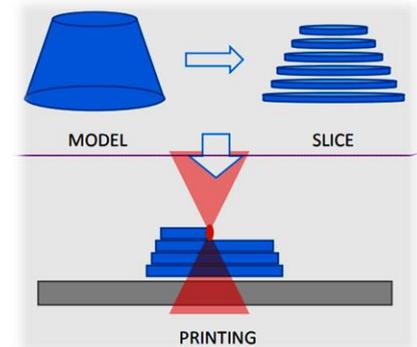
Séverine Durieux

Emmanuel Duc



LA FABRICATION ADDITIVE

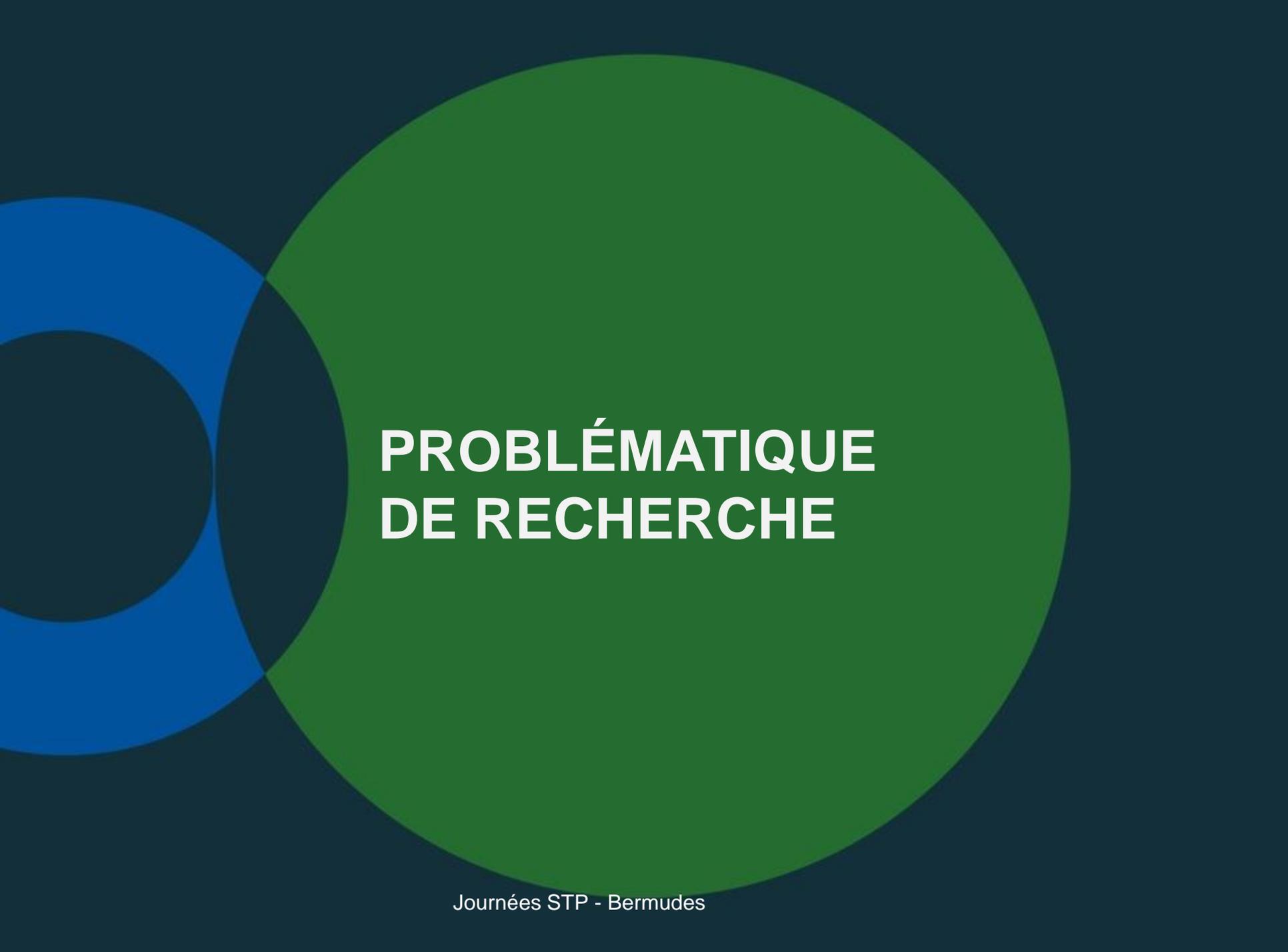
- « Un processus d'assemblage de matériaux qui permet de fabriquer des objets à partir de données d'un modèle 3D, habituellement couche après couche, par opposition aux méthodes de fabrication soustractives. »



Spécificités de l'exploitation d'un atelier de fabrication additive

- Temps de fabrication très longs (20h pour un volume de 300x300x300mm)
 - Multiplication du nombre de machines pour suivre les cadences mais pas des ressources secondaires
 - Incompatibilité entre le délai court attendu par le client et les temps de fabrication longs
- Lors de l'intégration des prétraitements et des post-traitements, la fabrication devient goulot
 - Garantie de la tenue mécanique et de la géométrie fonctionnelle de la pièce
 - Synchronisation et désynchronisation des flux
 - Réorganisation des flux logistiques pour réduire les coûts
 - Manque de produits en aval et en amont
 - Mutualisation des ressources amonts et avales
- Intervention humaine importante aux changements de production
 - Problèmes de planification et d'allocation des ressources secondaires
 - Réduire les temps improductifs de préparation
 - Eviter les arrêts machines

- Gestion de la poudre tout au long de la ligne
 - Flux de la poudre
 - Recyclage : nettoyage des poudres
 - Problèmes de qualité et de caractéristiques mécaniques
 - Gestion de la durée de vie de la poudre
 - Temps de set-up
- Objectif industriel et scientifique
 - Développement d'outils d'aide à la décision intégrés pour la conception des ateliers 4.0
 - Pour la conception modulaire d'ateliers évolutifs
 - Pour l'ordonnancement des ateliers de fabrication additive



PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

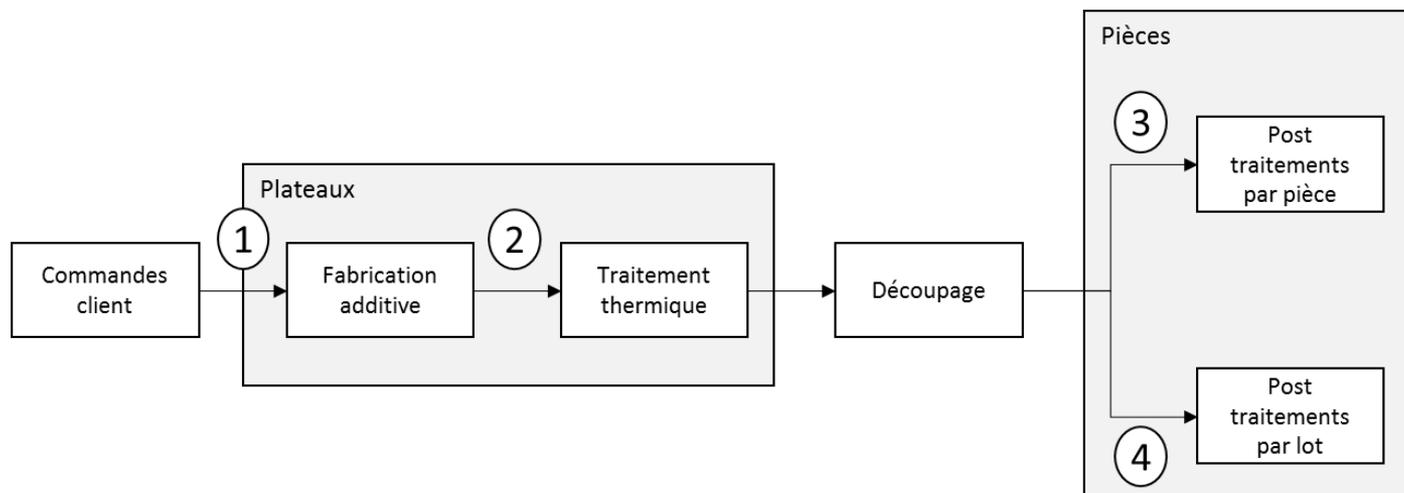
Typologies de décision dans un atelier

	Décisions stratégiques	Décisions tactiques	Décisions opérationnelles
Horizon temporel	Long terme	Moyen terme	Court terme
Fréquence et degré de répétitivité	Décisions uniques	Fréquence faible, décisions peu répétitives	Décisions très nombreuses et répétitives
Degré d'incertitude des informations	Elevé	Moyen	Quasi nul
Degré de réversibilité	Quasi nul	Moyen	Elevé
Niveau de décision	Direction générale	Directeurs fonctionnels et administratifs	Décisions décentralisées

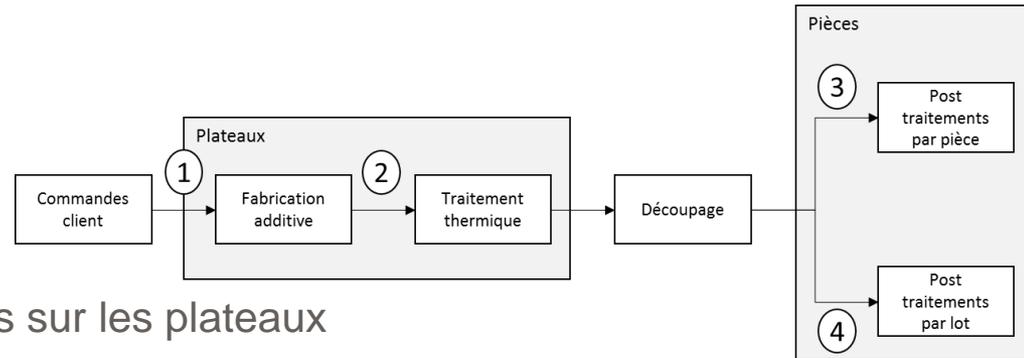
H.Igor Ansoff (1979), Dhillon (2004)

Problématique de recherche : Niveau opérationnel

Comment réaliser un ordonnancement optimal en prenant en compte les spécificités de la fabrication additive ?



○ Niveau opérationnel



○ 1 : Des commandes aux OF

- Répartition des différentes pièces sur les plateaux
- Ordonnancement des machines de fabrication additive

○ 2 : Traitement thermique par lot de plateaux

- Détermination de la taille économique de lot
 - Comment lotir les plateaux pour le traitement thermique ?
 - Quand lancer le traitement thermique ?

○ 3 : Post traitement par lot de pièces

- Détermination de la taille économique de lots

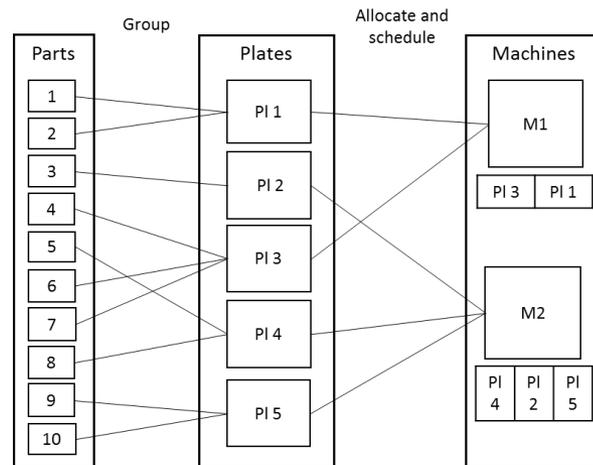
○ 4 : Post traitement par pièce

- Répartition des pièces sur les différentes machines
- Ordre dans lequel réaliser les pièces sur chaque machine

1 : Des commandes aux OF

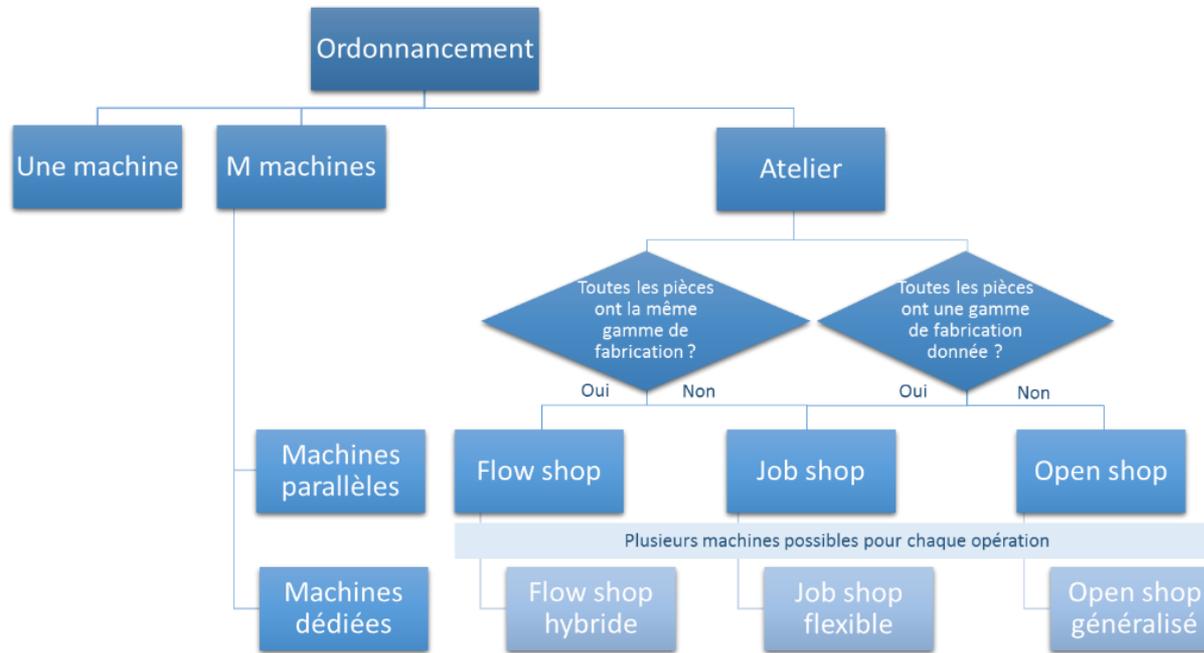
Questions :

- Comment répartir les lignes de commande par plateau ?
- Combien de pièces attribuer à chaque plateau ?
- Sur quelle machine lancer le plateau ?
- Dans quel ordre lancer les plateaux ? Et quand ?



- Répartition des différentes pièces sur les plateaux :
 - Bin packing : 2BP|R|F (Wascher, 2007)
 - 2BP : Bin Packing à 2 dimensions
 - R : Pièces non orientées
 - F : Contrainte guillotine non prise en compte
 - Méthodes de résolution :
 - Métaheuristiques :
 - Algorithme génétique : placement de polygone (Jakobs, 1996)
 - Recherche locale guidée : bin packing 3D (Faroe, 2003)
 - Recuit simulé : problèmes de placement (Dowsland, 1993)
 - Heuristique hybride (Hong, 2014)
 - Heuristique séquentielle (Cui, 2015)

○ Ordonnancement des machines de fabrication additive

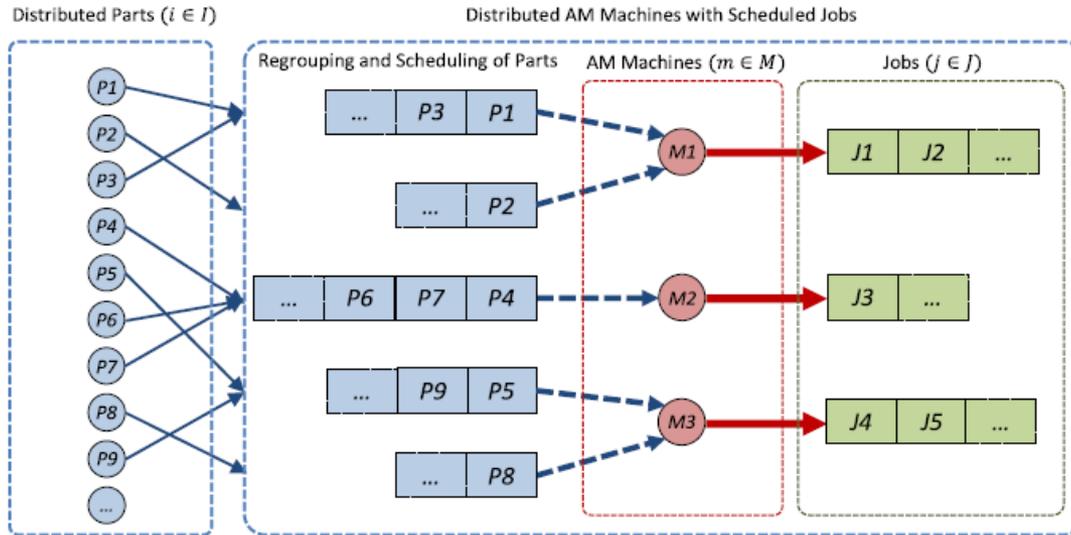


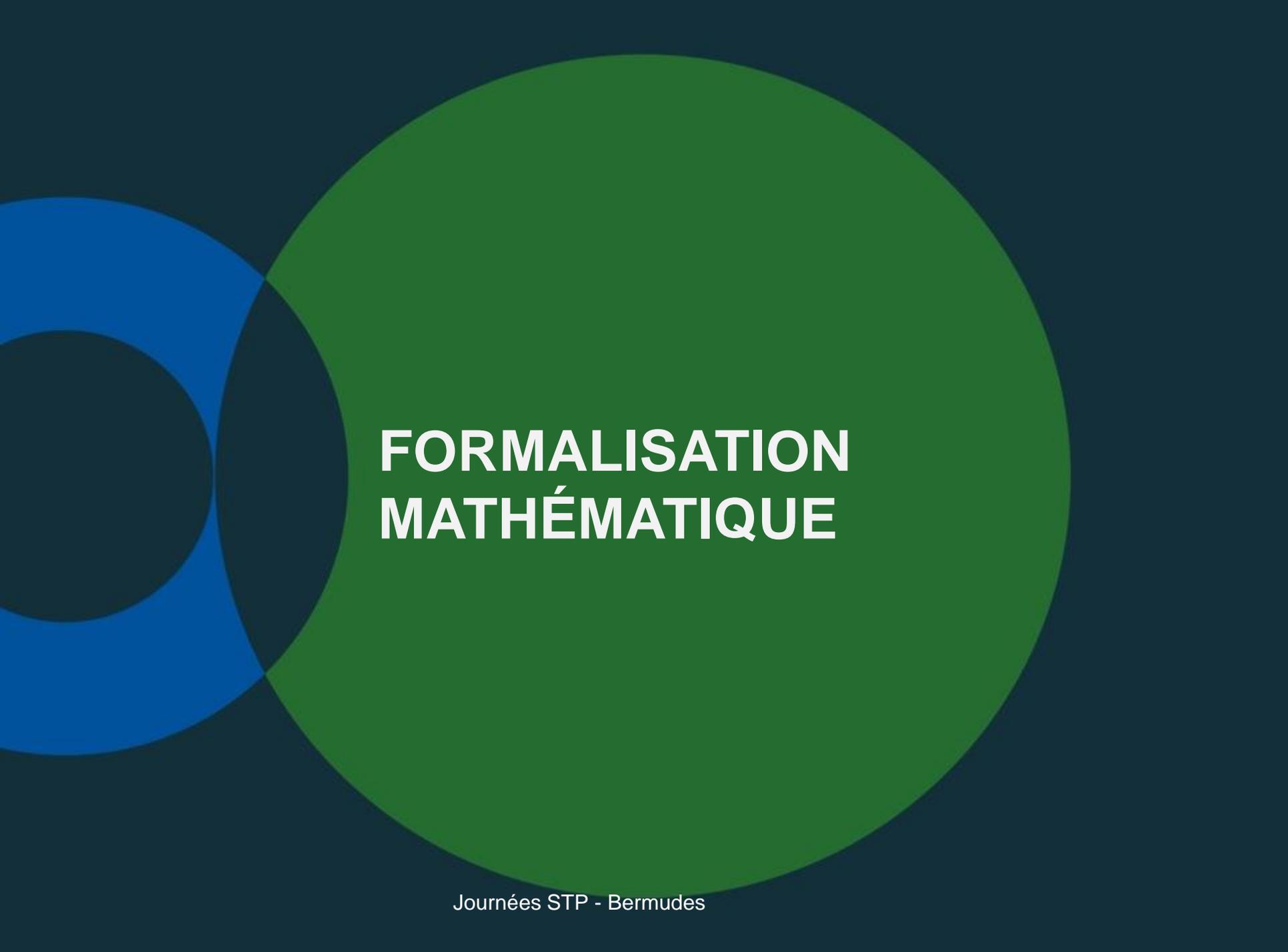
(Lacerte, 2004)
(Caumond, 2006)
(Sioud, 2011)
(Bitar, 2016)

○ Ordonnancement à machines parallèles avec contrainte d'éligibilité

- Ordonnancement des machines de fabrication additive
 - Parmi les contraintes classiques d'ordonnancement, ce problème doit respecter :
 - La contrainte d'éligibilité : un plateau n'est pas compatible avec toutes les machines ;
 - Pas de précedence : seulement une opération doit être réalisée ;
 - Mode non-préemptif : il est impossible d'interrompre la machine en fonctionnement
 - A $t=0$, toutes les machines sont disponibles ;
 - Capacité machines : un plateau ;
 - Contraintes de set-up : entre deux plateaux, il y a soit un temps de nettoyage machine ou un temps de changement de poudre ;
 - Ressources auxiliaires : opérateurs.

- Ordonnancement des machines de fabrication additive
 - Ordonnancement en fabrication additive
 - Un seul article (Li, 2017) :
 - Pièces allouées aux machines puis regroupées sur les plateaux
 - Due dates non prises en compte





FORMALISATION MATHÉMATIQUE

Notations	
i	Indice du numéro de commande
j	Indice de la référence de pièce
l	Indice du numéro de l'OF
k	Indice de la référence de plateau
m	Indice du numéro de la machine de fabrication additive
nb_com	Nombre de commandes
nb_ref	Nombre de références de pièces
nb_OF	Nombre d'OF
nb_pla	Nombre de plateaux
nb_ma	Nombre de machines

Notations	
n	Index du numéro de la pièce
nb_piece_total	Nombre de pièces total
$réf_n^{pièce}$	Référence de la pièce n
(x_n, y_n)	Coordonnées de l'angle en bas à gauche de la pièce n

Gammes	
p_j	Référence de la poudre de la pièce j
qp_j	Quantité de poudre pour la pièce j
$largeur_j^{piece}$	Largeur de la pièce j
$longueur_j^{piece}$	Longueur de la pièce j
h_j^{piece}	Hauteur de la pièce j
$surf_j$	Surface de la pièce j $s_j = largeur_j * longueur_j$
v_j	Volume de la pièce j $v_j = s_j * h_j^{piece}$
h_j^{couche}	Hauteur de couche pour la pièce j

Plateaux	
$largeur_k^{pla}$	Largeur du plateau k
$longueur_k^{pla}$	Longueur du plateau k

$plateau_{k,m} = 1$ si le plateau k est compatible avec la machine m

Commandes	
d_i	Due date de la commande i
$nb_ligne_com_i$	Nombre de lignes dans la commande i

Soit $ref_{c,i}^{com}$ la référence de la pièce de la ligne c de la commande i .

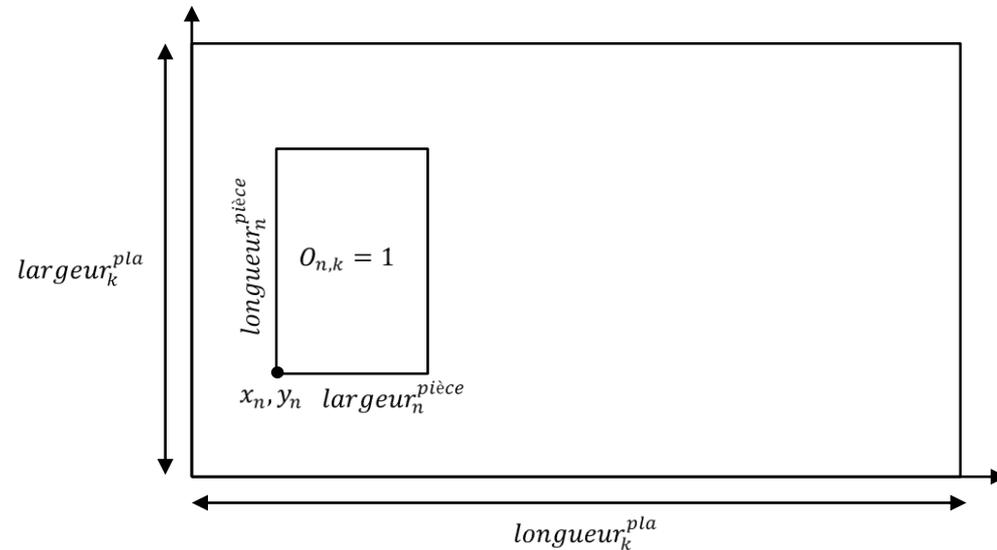
Soit $qté_{c,i}^{com}$ la quantité associée.

Une ligne c de la commande i est caractérisée par le 2-uplet $\{ref_{c,i}^{com}; qté_{c,i}^{com}\}$

Machines	
$h_m^{machine}$	Hauteur maximale acceptée par la machine m
cop_m	Coût opératoire de la machine m
e_m	Efficacité de la machine m
OC_m	Coût opératoire de la machine m
$vitesse_m^{vol}$	Intervalle de temps cumulé par unité de hauteur pour la machine m

○ Inspirée de la formalisation de (Li and Zhang, 2018)

Variables de décision	
$X_{n,l}$	= 1 Si la pièce n est affectée à l'OF l = 0 Sinon
Y_l	= 1 Si l'OF l a été créé = 0 Sinon
$PL_{n,z}$	= 1 Si la pièce n est placée à gauche de la pièce z = 0 Sinon
$PB_{n,z}$	= 1 Si la pièce n est placée en dessous de la pièce z = 0 Sinon
$O_{n,k}$	= 1 Si la pièce n est placée de telle manière à ce que sa largeur soit parallèle à la largeur du plateau k utilisé pour l'OF l = 0 Sinon



○ Contraintes :

- Une pièce ne peut être assignée à un OF qui n'a pas été créé

$$\forall n \in \{1, \dots, nb_piece_total\}, \forall l \in \{1, \dots, nb_OF\}, X_{n,l} \leq Y_l$$

- Chaque pièce est affectée à un et un seul OF

$$\forall n \in \{1, \dots, nb_piece_total\}, \sum_l X_{n,l} = 1$$

- Une pièce ne peut pas être placée à l'extérieur d'un plateau

$$\forall n \in \{1, \dots, nb_pièce_total\}, x_n + largeur_n^{pièce} O_{n,k} + longueur_n^{pièce} (1 - O_{n,k}) \leq largeur_k^{pla}$$

$$\forall n \in \{1, \dots, nb_pièce_total\}, y_n + longueur_n^{pièce} O_{n,k} + largeur_n^{pièce} (1 - O_{n,k}) \leq longueur_k^{pla}$$

- Les pièces d'un OF doivent rentrer sur le plateau attribué

$$\forall l \in \{1, 2, \dots, nb_OF\}, \forall \alpha \in \{1, 2, \dots, nb_ligne_OF_l\}, \sum_{\alpha, l} S_{réf_OF_{\alpha, l}} \leq longueur_l^{pla} * largeur_l^{pla}$$

○ Contraintes :

- Deux pièces sur un même plateau ne peuvent pas se superposer

$$\forall z, n \in \{1, \dots, nb_pièce_total\}, z \neq n, x_z + largeur_z^{pièce} O_{z,k} + longueur_z^{pièce} (1 - O_{z,k}) \leq x_n + largeur_k^{pla} (1 - PL_{z,n})$$

$$\forall z, n \in \{1, \dots, nb_pièce_total\}, z \neq n, y_z + longueur_z^{pièce} O_{z,k} + largeur_z^{pièce} (1 - O_{z,k}) \leq y_n + longueur_k^{pla} (1 - PB_{z,n})$$

$$\forall z, n \in \{1, \dots, nb_pièce_total\}, z < n, \forall l \in \{1, \dots, nb_{OF}\}, PL_{z,n} + PB_{z,n} + PL_{n,z} + PB_{n,z} \geq X_{z,l} + X_{n,l} - 1$$

- La hauteur des pièces d'un OF de doit pas dépasser la hauteur maximale acceptée par la machine.

$$\forall l \in \{1, 2 \dots nb_{OF}\}, \forall \alpha \in \{1, 2 \dots nb_{ligne_{OF}l}\}, h_{ref_{\alpha,l}^{OF}}^{pièce} \leq h_{ma_l}^{machine}$$

- Toutes les commandes doivent être complètes.

$$\forall i \in \{1, 2 \dots nb_{com}\}, \forall c \in \{1, 2 \dots nb_{ligne_{com}i}\}, qté_{c,i}^{com} = \sum_{\alpha,l} qté_{\alpha,l}^{OF} \cdot Z_{\alpha,l,i,c}$$

$$Z_{\alpha,l,i,c} = \begin{cases} 1 & \text{si } ref_{\alpha,l}^{OF} = ref_{c,i}^{com} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

○ Contraintes :

- Les variables de décision sont des variables binaires

$$\forall l \in \{1, \dots, nb_OF\}, Y_l \in \{0,1\}$$

$$\forall n \in \{1, \dots, nb_piece_total\}, \forall l \in \{1, \dots, nb_OF\}, X_{n,l} \in \{0,1\}$$

$$\forall n \in \{1, \dots, nb_piece_total\}, O_{n,k} \in \{0,1\}$$

$$\forall z, n \in \{1, \dots, nb_piece_total\}, PB_{z,n}, PL_{z,n} \in \{0,1\}$$

- Les coordonnées sont des valeurs positives ou nulles

$$\forall n \in \{1, \dots, nb_piece_total\}, x_n, y_n \geq 0$$

Variables de décision	
ma_l	Numéro de la machine à laquelle l'OF l est attribué
pla_l	Référence du plateau de l'OF l
nb_ligne_0	Nombre de lignes de l'OF l

Soit $ref_{a,l}^{OF}$ la référence de la pièce de la ligne a de l'OF l .

Soit $qté_{a,l}^{OF}$ la quantité associée.

Soit $commande_{a,l}$ la commande à laquelle appartient la ligne a de l'OF l .

Une ligne a de l'OF l est caractérisée par le 3-uplet $\{ref_{a,l}^{OF} ; qté_{a,l}^{OF} ; commande_{a,l}\}$.

Éléments calculés	
v_l	Volume total de l'OF l
p_l	Poudre de l'OF l
$tps_lasage_{l,m}$	Temps de lasage pour l'OF l sur la machine m
tps_tth_l	Temps de traitement thermique pour l'OF l
$tps_decoupage_l$	Temps de découpage pour l'OF l
$tps_refroidissemen$	Temps de refroidissement pour l'OF l
$tps_recup_poudre_l$	Temps de récupération de poudre pour l'OF l
$tps_nettoyage_l$	Temps de nettoyage pour l'OF l

$aff_{l,m} = 1$ si l'OF l est affecté à la machine m

- Le volume de l'OF l est calculé à partir du volume de chaque pièce contenue dans l'OF.

$$v_l = \sum_n X_{n,l} * v_{ref_n}^{piece}$$

- Le temps de lasage d'un OF l sur une machine m est calculé à partir de l'équation :

$$temps_lasage_{l,m} = \frac{v_l}{vitesse_m^{vol}}$$

- Contraintes :

- Toutes les pièces d'un OF doivent utiliser la même poudre.

$$\forall l \in \{1, 2, \dots, nb_OF\}, \forall \alpha \in \{1, 2, \dots, nb_ligne_OF_l - 1\}, p_{ref_{\alpha,l}}^{OF} = p_{ref_{\alpha+1,l}}^{OF}$$

- Le plateau choisi pour un OF doit être compatible avec la machine choisie.

$$\forall l \in \{1, 2, \dots, nb_OF\}, \quad plateau_{pla_l, ma_l} = 1$$

- Respect des due dates : minimiser la somme de l'ensemble des retards

$$\forall i \in \{1, \dots, nb_com\}, retard = \sum_i retard_i$$

$$\forall i \in \{1, \dots, nb_com\}, retard_i = \begin{cases} df_i - d_i & \text{si } df_i - d_i \geq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

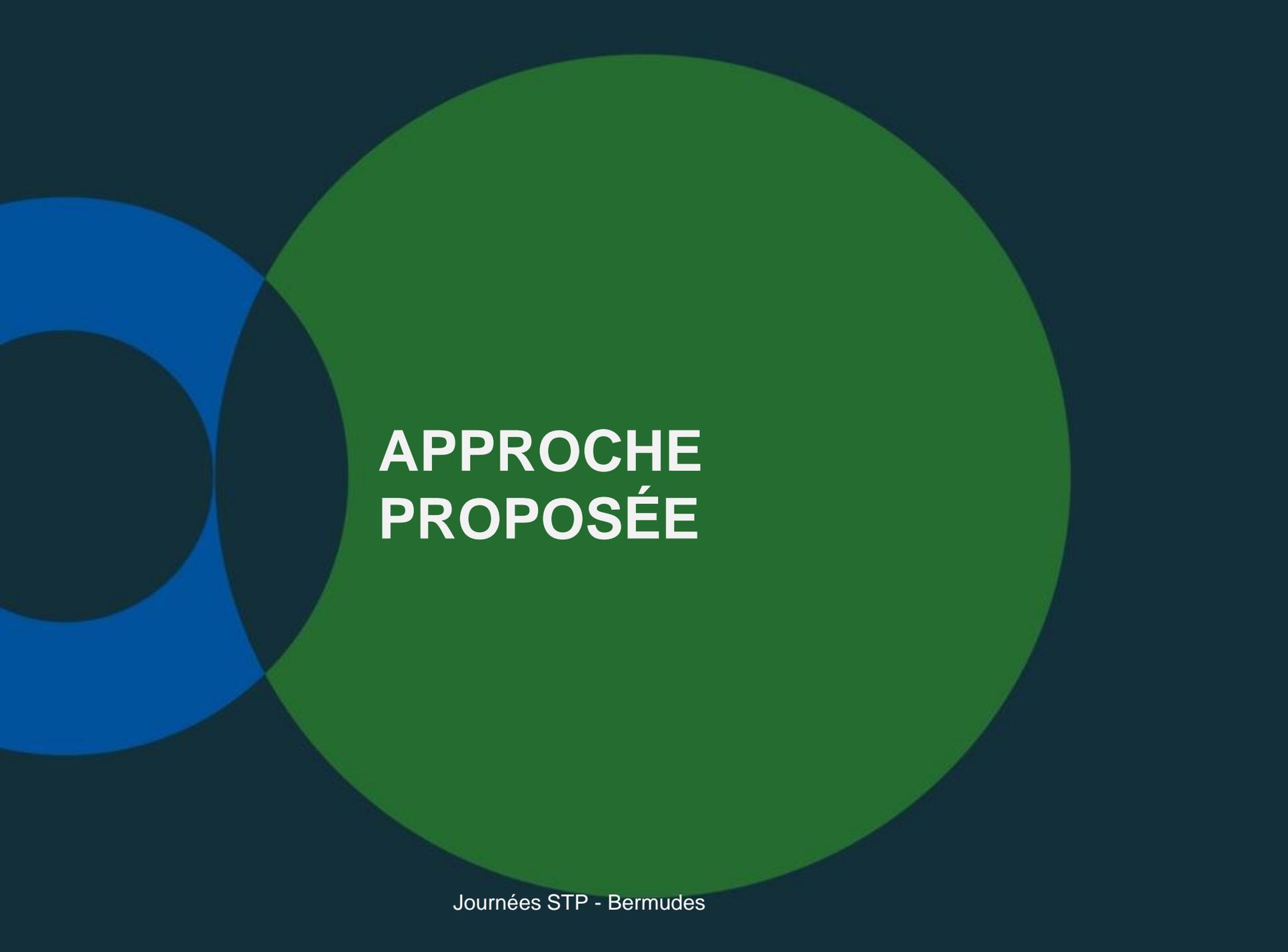
- Taux d'utilisation : maximiser la moyenne de tous les taux d'utilisation

$$\forall m \in \{1, \dots, nb_ma\}, taux_d'utilisation = \frac{\sum_m taux_m}{nb_ma}$$

- Coût de production : minimiser le coût total de production de l'ensemble des OF

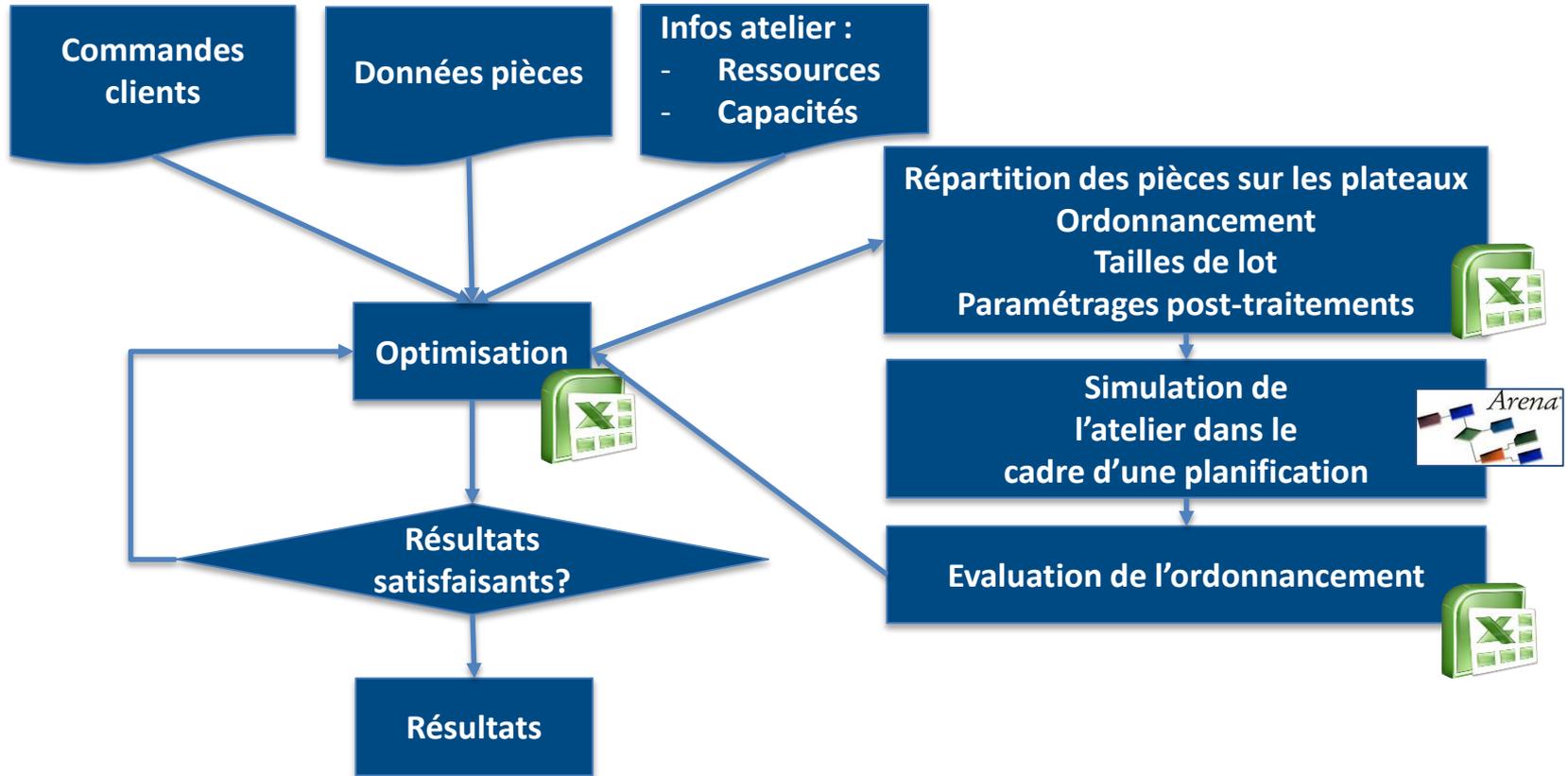
$$C_{prod}^{tot} = \sum_l C_{prod_l} + \sum_m C_{setup_m}$$
$$C_{prod_l} = aff_{l,m} * temps_lasage_{l,m} * OC_m$$
$$C_{setup_m} = ST_m * HC$$

- Avec :
 - ST_m : Temps de setup de chaque machine
 - HC : Coût horaire des opérateurs

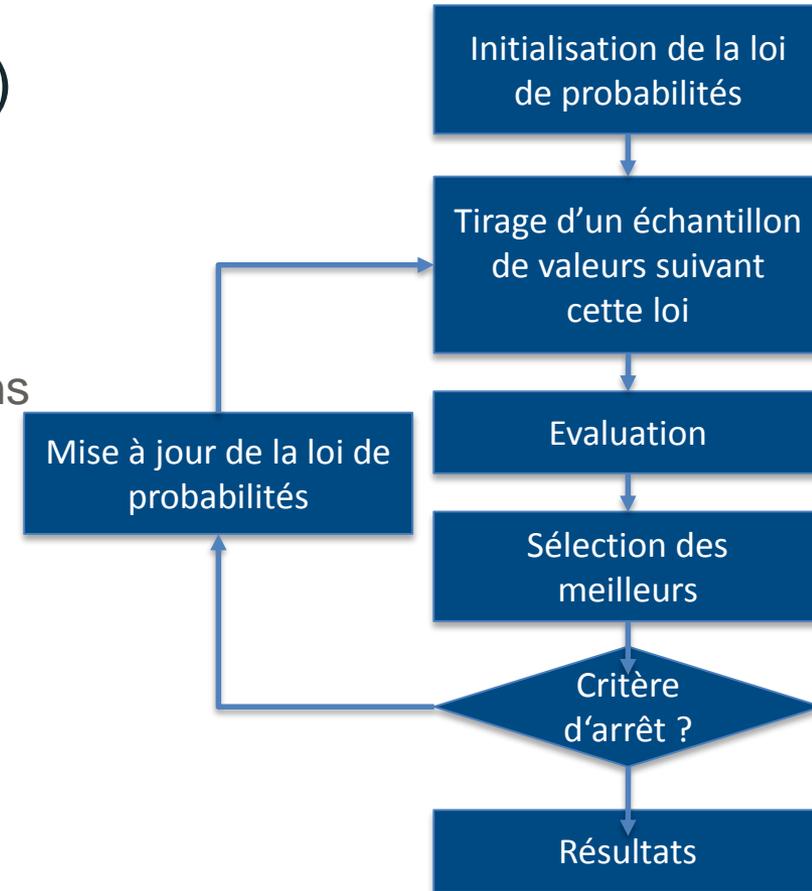


APPROCHE PROPOSÉE

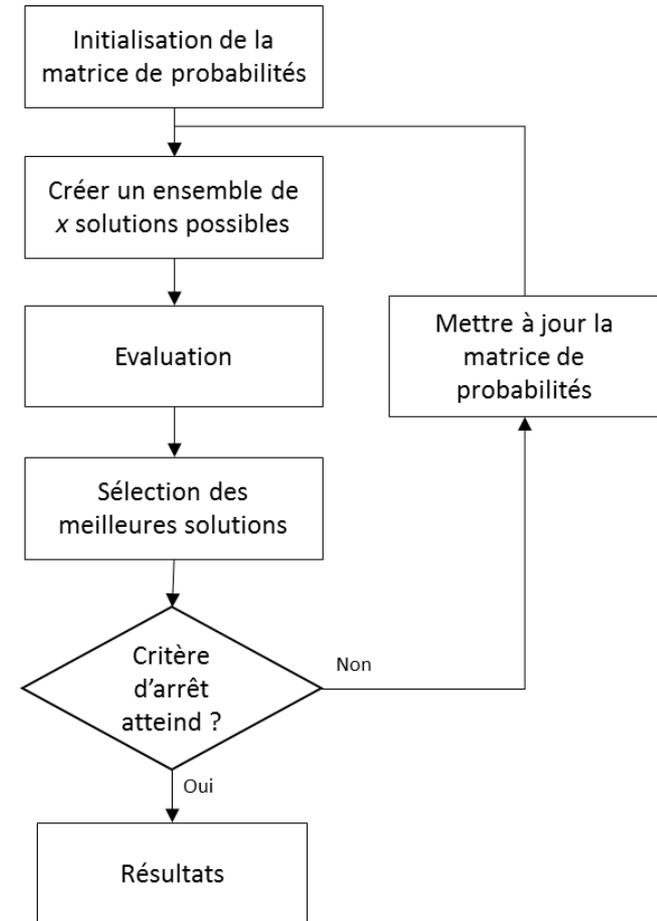
Démarche de résolution

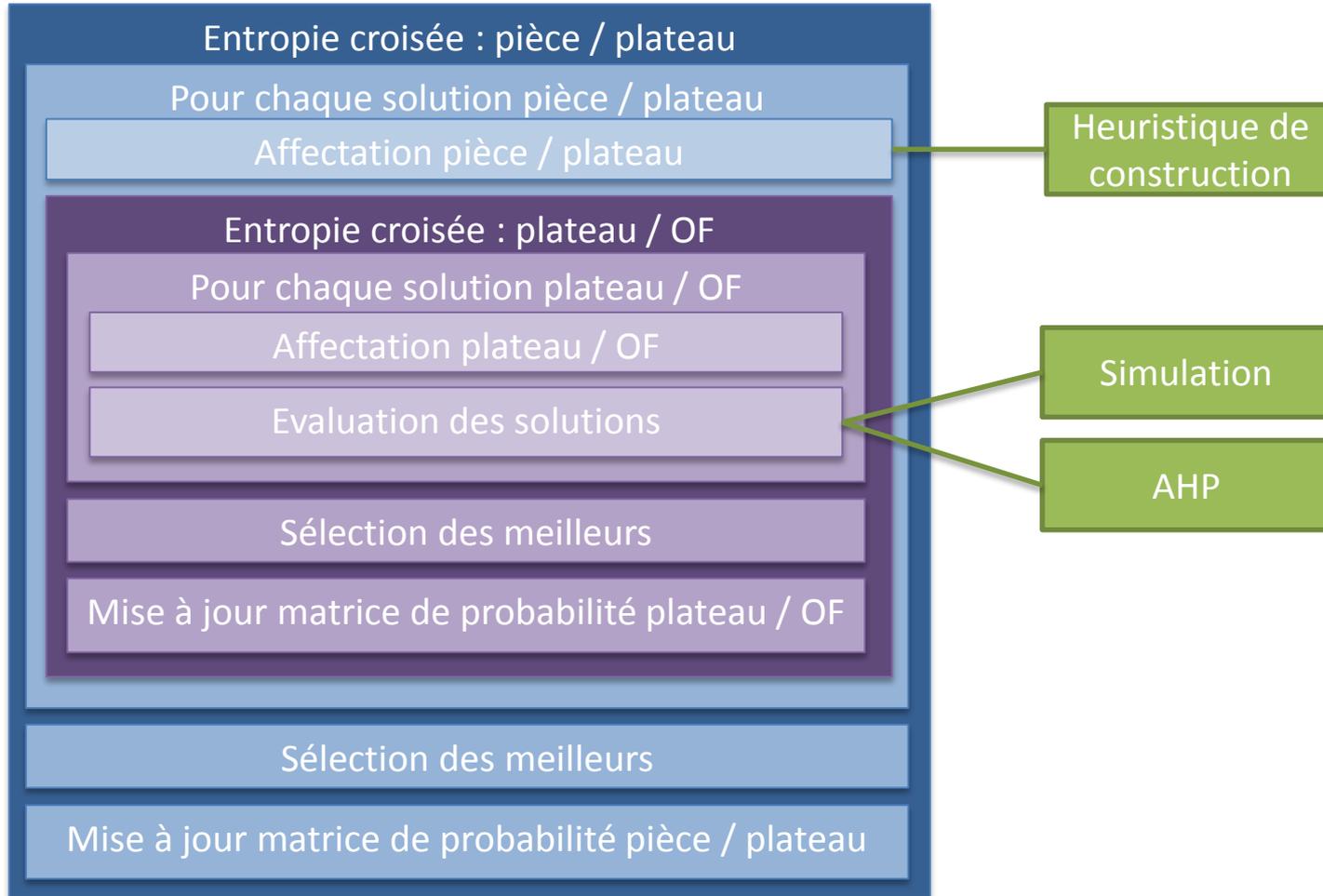


- Entropie croisée (Rubinstein, 1997)
 - Probabilités d'évènements rares
 - Adaptation à des problèmes discrets
 - Procédure itérative en 2 phases :
 - Génération d'un échantillon de solutions aléatoires
 - Mise à jour des paramètres probabilistiques
 - Notion d'apprentissage



- Paramètres et données d'entrée
- Entropie croisée
- Deux entrées différentes :
 - Pièces : heuristique de construction
 - Plateaux constitués
- Evaluation
 - Modèle de simulation
 - Multicritère : AHP
- Critère d'arrêt : nombre d'itérations





○ Placement des pièces (Cui et al., 2015)

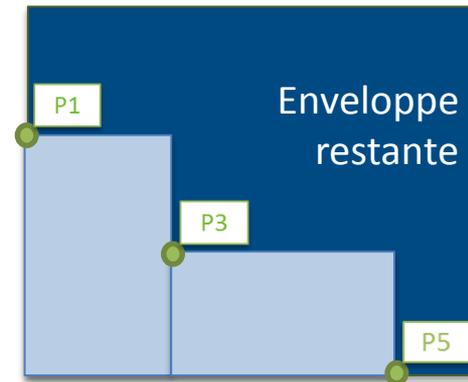
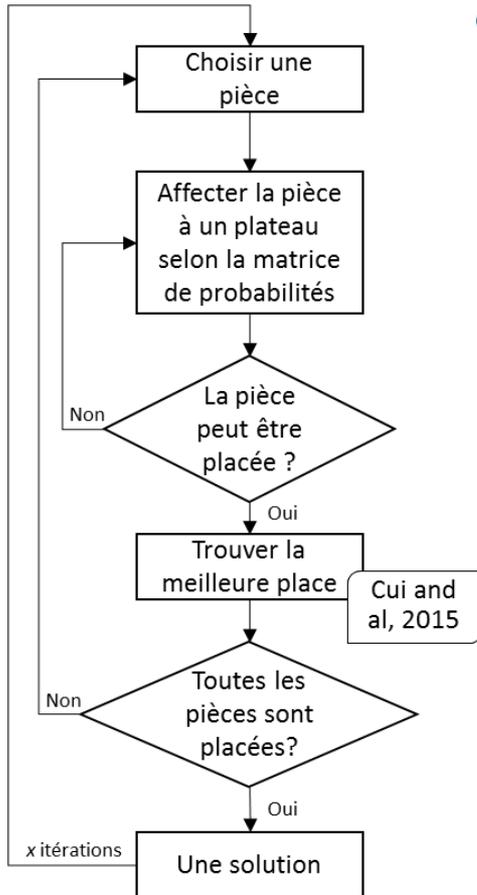
○ Pour les 2 orientations

○ Pour toutes les positions possibles

- Placer la pièce
- Vérifier si elle rentre
- Calculer l'aire de l'enveloppe restante

○ Choisir la position qui maximise l'aire de l'enveloppe restante

○ Mettre à jour l'aire de l'enveloppe restante et l'ensemble des solutions possibles



○ Modèle de simulation

○ Périmètre du modèle

- De l'arrivée des poudres et des plateaux aux pièces finies

○ Cadre expérimental

- Variables d'entrée :

- Composition des OF
- Ordonnancement des OF sur chaque machine de fabrication additive

- Paramètres du modèle

- Nombre de plateaux de chaque type

- Variables de sortie :

- Taux d'utilisation des machines de fabrication additive
- Temps de set-up (temps de changement de poudre et temps de nettoyage de la machine) des machines de fabrication additive
- Date de sortie de chaque pièce

○ Modèle de simulation

○ Cadre expérimental

○ Conditions d'initialisation :

- A $t=0$, toutes les machines sont disponibles.
- Les machines de fabrication additive sont considérées comme sortant d'un changement de poudre.
- Il n'y a aucun en-cours.
- Le stock de plateaux neufs est plein.

○ Conditions de terminaison :

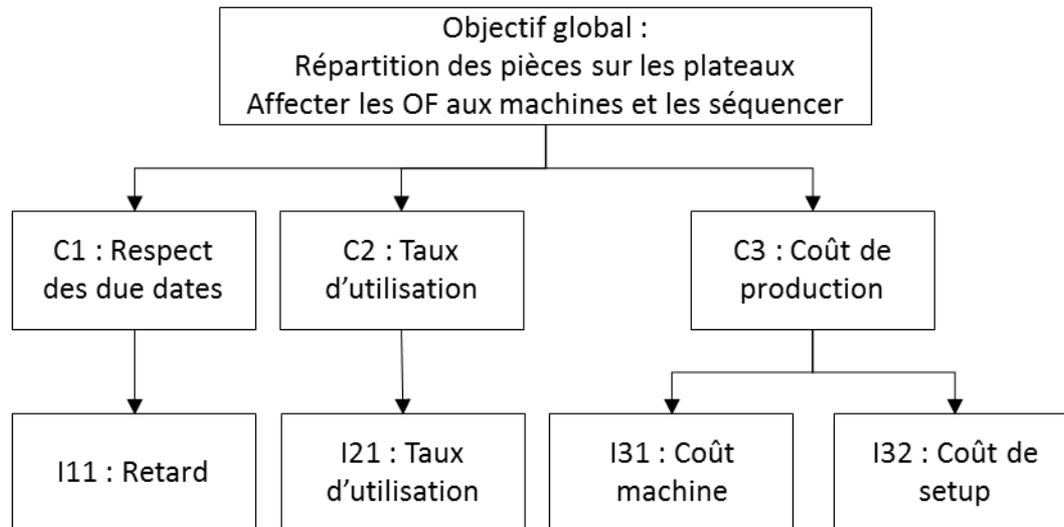
- La simulation se termine lorsque toutes les pièces ont été fabriquées.

○ Compression et collecte des résultats :

- Collecte des résultats : sur l'ensemble du temps de simulation.
- Données recueillies dans un fichier Excel afin d'être exploitées lors de l'évaluation des solutions testées.
- Résultats optimistes pour les due dates.

○ Méthode multicritère

○ Analytic Hierarchy Process (AHP) (Saaty, 1980)



- Problème traité :
 - 1 : Des commandes aux OF
 - Répartition des différentes pièces sur les plateaux
 - Bin packing : 2BP|R|F (El Hayek, 2006)
 - Ordonnancement des machines de fabrication additive
 - Ordonnancement à machines parallèles avec contrainte d'éligibilité
- Méthodes utilisées :
 - Heuristique de construction : création des solutions possibles
 - Pour les pièces : algorithme pour trouver la meilleure place
 - Entropie croisée : optimisation
 - Simulation : évaluation
 - AHP : évaluation multicritère
- Perspectives :
 - Eprouver la méthode sur des cas industriels
 - Etendre avec l'ordonnancement sur les post-traitements

Avez-vous des
questions ?

