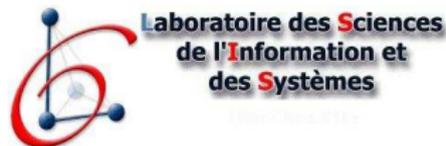


# Un outil d'aide à la décision générique pour des problèmes de planification et d'ordonnancement

## Applications industrielles & usine du futur

Nathalie Klement, Olivier Gibaru

4 novembre 2016



# Introduction

## Usine du futur

- Agilité des systèmes de production
- Systèmes de production changeables  
[Benkamoun et al., 2015]
  - Flexibles
  - Reconfigurables



# Introduction

## Usine du futur

- Agilité des systèmes de production
- Systèmes de production changeables [Benkamoun et al., 2015]
  - Flexibles
  - Reconfigurables
- Outil d'aide à la décision pour le pilotage de ces systèmes
- Niveaux
  - Stratégique
  - Tactique
  - Opérationnel



# Sommaire

- 1 Outil d'aide à la décision générique et modulaire
- 2 Applications
  - Niveau tactique : application hospitalière
  - Niveau opérationnel : injection plastique
  - Niveau opérationnel : ordonnancement avec contraintes de précedence
- 3 Usine du futur
- 4 Conclusion

# Objectif

## Créer un outil d'aide à la décision générique

- Planification d'activités
- Affectation de ressources
- Ordonnancement

# Objectif

## Créer un outil d'aide à la décision générique

- Planification d'activités
- Affectation de ressources
- Ordonnancement
- Contraintes :
  - Temporelles : temps de traitement, temps de disponibilités, due date, temps de changement de séries
  - Incompatibilités activités / ressources

# Objectif

## Créer un outil d'aide à la décision générique

- Planification d'activités
  - Affectation de ressources
  - Ordonnancement
- 
- Contraintes :
    - Temporelles : temps de traitement, temps de disponibilités, due date, temps de changement de séries
    - Incompatibilités activités / ressources
  - Critères :
    - Makespan, respect des due dates, nombre d'activités réalisées

# Généricité

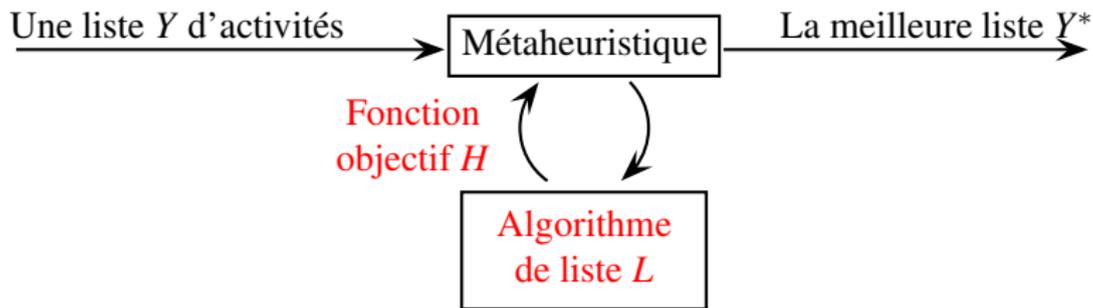
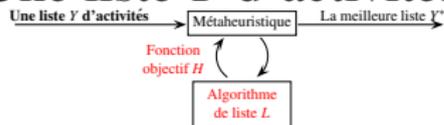


FIGURE 1 – Hybridation métaheuristique - algorithme de liste

# Une liste $Y$ d'activités



$Y = (Y_i)_{i \in \{1, N\}}$  = séquence d'activités, avec  $Y_i$  un numéro d'activité

$X = (X_i)_{i \in \{1, N\}}$  = affectation, avec  $X_i$  affectation de l'activité  $i$

$$Y \in \Omega' \xrightarrow{\text{Algo de liste } L} L(Y) = X \in S \xrightarrow{\text{Critère } H} H(X)$$

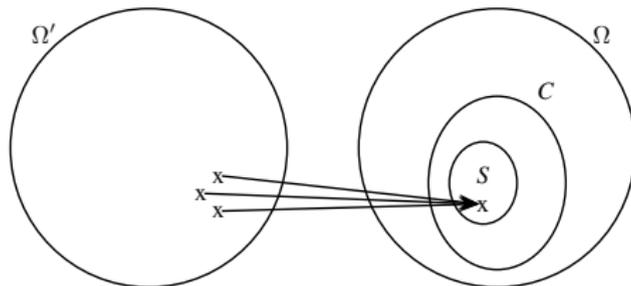
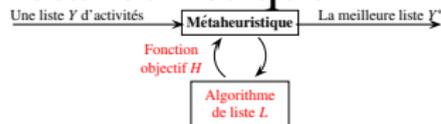


FIGURE 2 – Ensembles de solution

# Métaheuristique



Utilisation d'une métaheuristique basée individu :

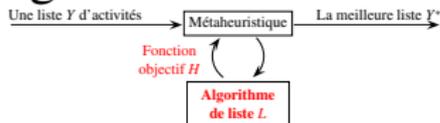
- Ensemble de solutions :  $\Omega'$
- Solution initiale : une liste d'activités  $Y$  aléatoire
- Système de voisinage :
  - Permutation  $P_{i,j}$  entre les activités  $i$  et  $j$
  - Propriété d'accessibilité et de réversibilité

- Recherche locale itérée
- Algorithme du recuit simulé

Mais aussi métaheuristique à population :

- Optimisation par Essaim de Particules

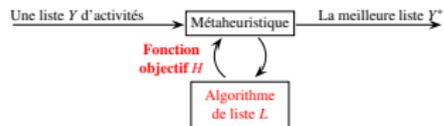
# Algorithme de liste



- Construction de la solution  $X$  à partir de la liste  $Y$
- Algorithme de liste pour conserver l'ordre construit par la métaheuristique

Détaillée pour chaque application

# Fonction objectif

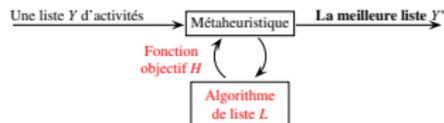


$$X^* = \min_{\forall X \in \Omega} H(X)$$

- Méthode des critères pondérés

Détaillée pour chaque application

# La meilleure liste $Y^*$




---

## Algorithme 1 : Simulated annealing

---

**Données :** Initial solution  $Y$ , Temperature  $T_0$ , Decreasing factor  $\alpha$

- 1  $T := T_0$
  - 2  $X := L(Y)$
  - 3  $X^* := X$
  - 4 **tant que** *necessary faire*
  - 5     Choose uniformly and randomly  $Y' \in V(Y)$
  - 6      $X' = L(Y')$
  - 7     **si**  $H(X') < H(X^*)$  **alors**
  - 8          $X^* := X'$
  - 9          $Y^* := Y'$
  - 10    **si**  $H(X') \leq H(X)$  **alors**
  - 11          $X := X'$
  - 12          $Y := Y'$
  - 13    **sinon**
  - 14         **si**  $\text{rand}[0, 1] \leq e^{-\frac{H(Y') - H(Y)}{T}}$  **alors**
  - 15              $X := X'$
  - 16              $Y := Y'$
  - 17    Compute the new temperature  $T := \alpha \times T$
-

## Différents niveaux de décision

Decision level	Horizon timing	Problems
Strategic	Years	Sizing of the system
Tactical	Months	Activities planing Resources assignment
Operational	Weeks, Days	Activities scheduling Response to hazards

Description des différentes applications :

- Spécification
- Algorithme de liste
- Fonction objectif
- Résultats

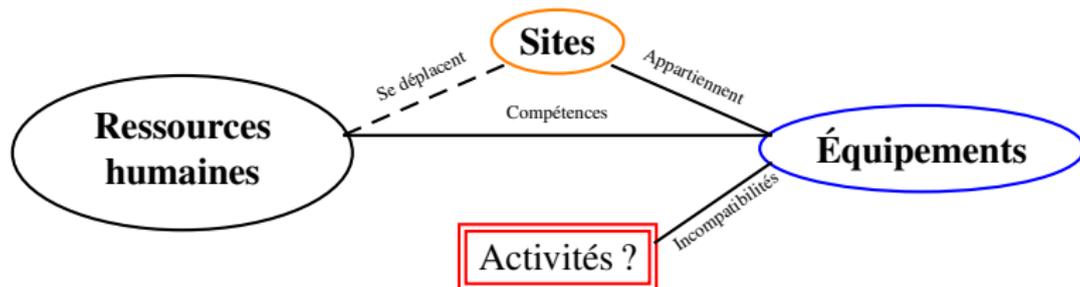
# Sommaire

- 1 Outil d'aide à la décision générique et modulaire
- 2 Applications
  - Niveau tactique : application hospitalière
  - Niveau opérationnel : injection plastique
  - Niveau opérationnel : ordonnancement avec contraintes de précedence
- 3 Usine du futur
- 4 Conclusion

# Spécification

[Klement et al., 2017]

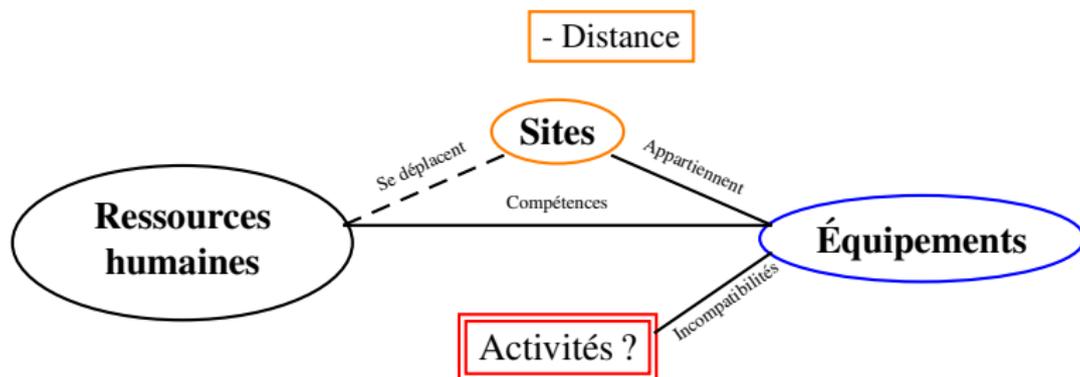
Planification d'activités avec affectation de ressources



# Spécification

[Klement et al., 2017]

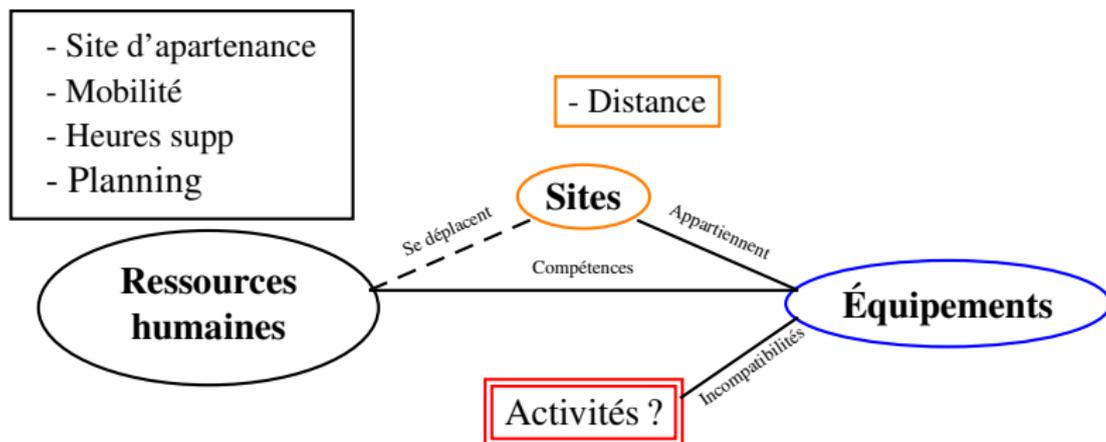
Planification d'activités avec affectation de ressources



# Spécification

[Klement et al., 2017]

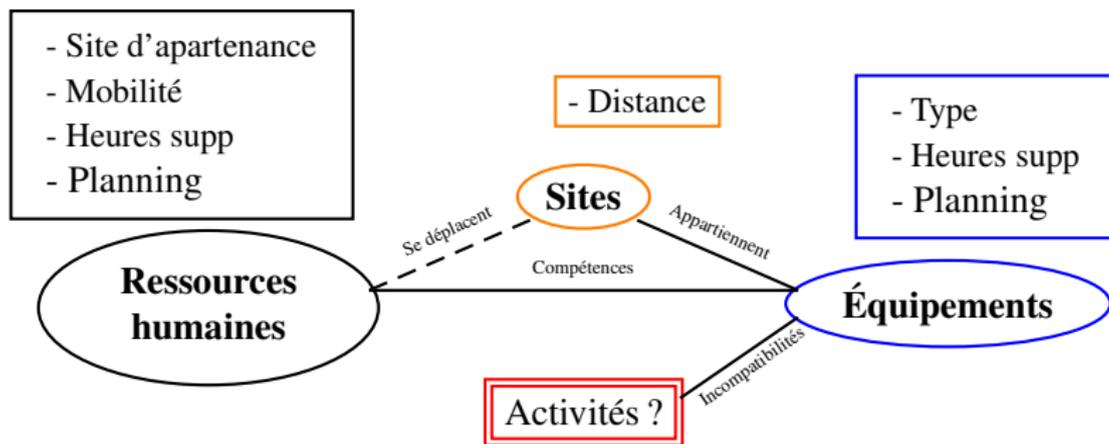
Planification d'activités avec affectation de ressources



# Spécification

[Klement et al., 2017]

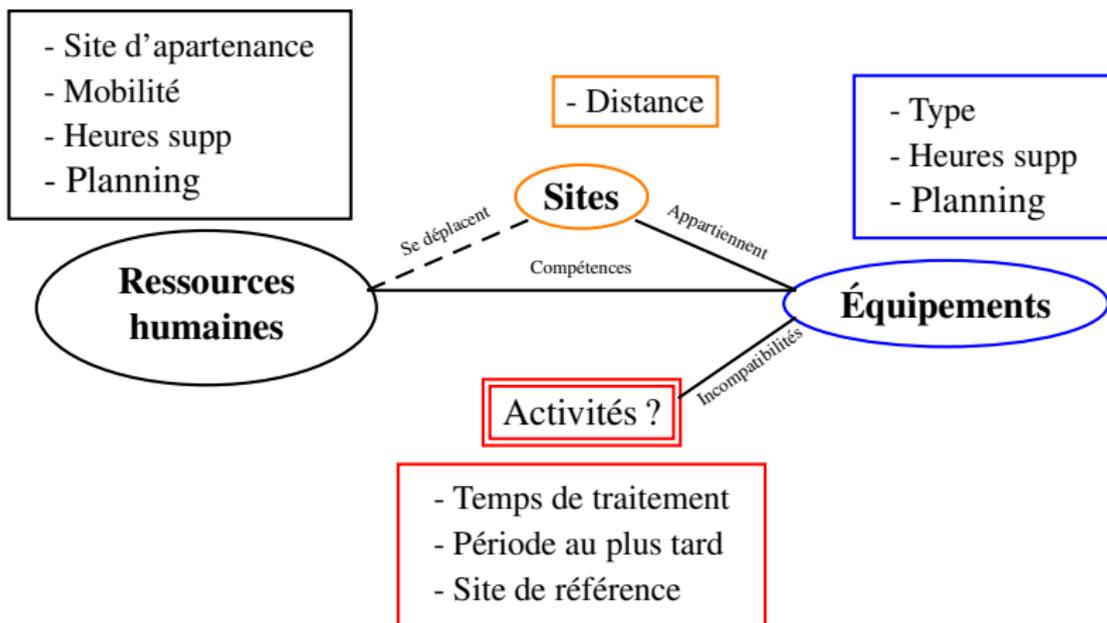
Planification d'activités avec affectation de ressources



# Spécification

[Klement et al., 2017]

Planification d'activités avec affectation de ressources



# Représentation

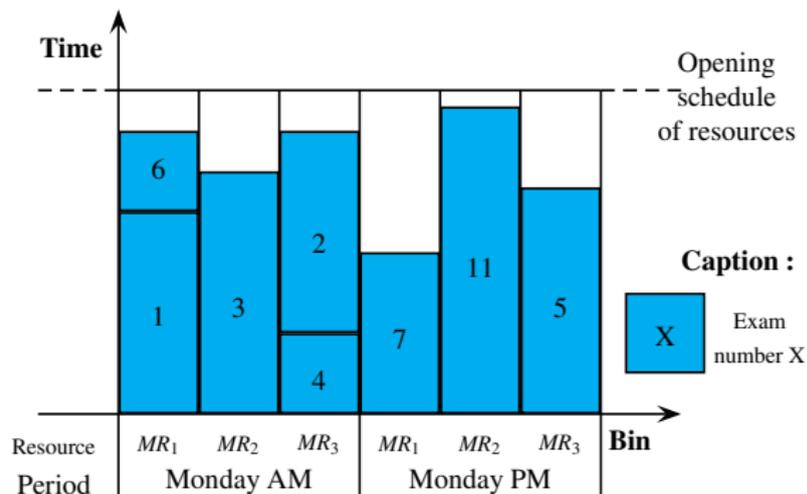


FIGURE 3 – Représentation du problème hospitalier sans les ressources humaines

# Tableau d'analogies

	<b>Problème du bin packing</b>	<b>Problème de planification d'activités avec affectation de ressources</b>
<b>Données</b>	Objet	Activité
	Boîte	Couple équipement-période
	Taille d'un objet	Temps de traitement d'une activité
	Capacité d'une boîte	Temps d'ouverture d'un équipement
	-	Période limite d'une activité
	-	Site de référence d'une activité
<b>Objectif</b>	Affecter les objets aux boîtes	Affecter les activités à une période et à un équipement
<b>Contraintes</b>	Contrainte de la capacité des boîtes	Contrainte de la durée d'ouverture des équipements
	-	Contrainte de compatibilité
<b>Critères</b>	Nombre de boîtes utilisées	Nombre de périodes affectées
	-	Nombre de périodes limites non respectées
	-	Nombre de sites de référence non respectés

# Algorithme de liste

---

## Algorithme 2 : Algorithme de liste First Fit CHT

---

**Données :** liste d'activités  $(\sigma_i)_{i \in N}$ ;  $p_{l,t}, \forall l \in L, \forall t \in T$ ;  $t_i, \forall i \in N$

```

1  $F_{l,t} := 0, \forall l \in L, \forall t \in T$ 
2 pour tous les  $i$  de 1 à  $|N|$  faire
3    $t := 1, l := 1, affecté := faux$ 
4   tant que  $(t \leq T) \wedge (affecté = faux)$  faire
5     tant que  $(l \leq L) \wedge (affecté = faux)$  faire
6       si l'activité  $\sigma_i$  est compatible avec l'équipement  $l$  ( $c_{\sigma_i,l} = 1$ )
7         alors
8           si l'activité  $\sigma_i$  tient dans le couple  $(l, t)$  ( $F_{l,t} + t_{\sigma_i} \leq p_{l,t}$ )
9             alors
10              Affecter l'activité  $\sigma_i$  au couple  $(l, t)$  :
11               $x_{\sigma_i,l,t} := 1$ 
12               $F_{l,t} := F_{l,t} + t_{\sigma_i}$ 
13               $affecté := vrai$ 
14             $l := l + 1$ 
15           $t := t + 1$ 

```

---

# Fonction objectif

$$X^* = \min_{\forall X \in \Omega} H(X)$$

Aspect temporel :

- Makespan ?
- $H_S$  : somme des périodes affectées
- $H_D$  : nombre de due dates non respectées

$$H(X) = 10^{\omega_D} \times H_D(X) + H_S(X)$$

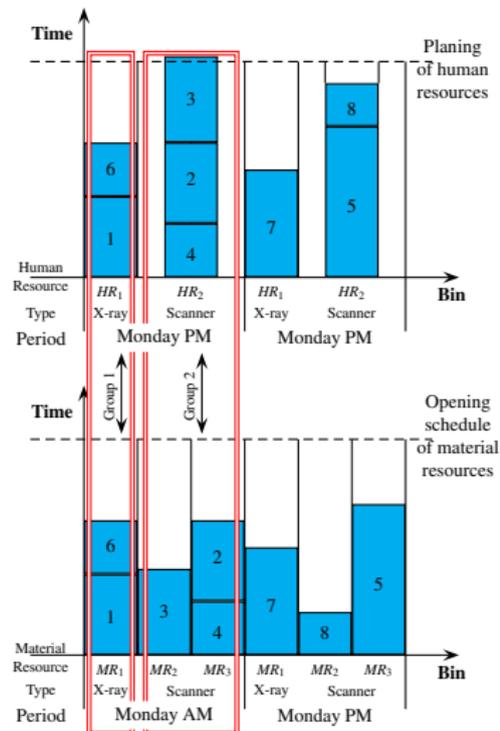
$$10^{\omega_D} > \max_{\forall X \in \Omega} H_S(X)$$

# Résultats

- Instances générées aléatoirement et uniformément
- Représentatives de la réalité :
  - Nombre d'activités  $\in [50, 500]$
  - Nombre de sites = 3
  - Nombre d'équipements  $\in [4, 8]$
  - Horizon temporel : 1 mois

Instance	CPLEX	[Gourgand et al., 2014]	ILS*	SA*
50A	(0; 51)	(0; 51)	(0; 51)	(0; 51)
100A	(0; 131)	(0; 131)	(0; 131)	(0; 131)
200A	(0; 266)	(0; 266)	(0; 266)	(0; 266)
3000A	-	(0; 548)	(0; 537)	(0; 534)
4000A	(0; 830)	(0; 890)	(0; 841)	(0; 835)
500A	-	(0; 1350)	(0; 1241)	(0; 1234)
50B	(1; 150)	(10; 147)	(1; 151)	(1; 150)
100B	(0; 517)	(2; 535)	(1; 516)	(0; 518)
200B	-	(3; 1197)	(0; 1154)	(0; 1135)
500B	-	(194; 8218)	(19; 6382)	(18; 6659)

# Avec les ressources humaines ?



# Sommaire

- 1 Outil d'aide à la décision générique et modulaire
- 2 Applications
  - Niveau tactique : application hospitalière
  - Niveau opérationnel : injection plastique
  - Niveau opérationnel : ordonnancement avec contraintes de précedence
- 3 Usine du futur
- 4 Conclusion

# Spécification

- Injection de pièces plastiques par lot
- 32 machines d'injection en parallèle
- 600 moules différents
  - Incompatibilité moule - machine
  - Pression d'injection
- Chaque lot de pièces
  - Due date
  - Temps de traitement
  - Un moule spécifique
  - Temps de changement de moule

# Spécification

- Injection de pièces plastiques par lot
- 32 machines d'injection en parallèle
- 600 moules différents
  - Incompatibilité moule - machine  
Pression d'injection
- Chaque lot de pièces
  - Due date
  - Temps de traitement
  - Un moule spécifique
  - Temps de changement de moule

**Changement de moules si nécessaire**

# Spécification

- Injection de pièces plastiques par lot
- 32 machines d'injection en parallèle
- 600 moules différents
  - Incompatibilité moule - machine  
Pression d'injection
- Chaque lot de pièces
  - Due date
  - Temps de traitement
  - Un moule spécifique
  - Temps de changement de moule

## Objectifs : minimiser

- Les retards
- Le nombre de changements de moule

**Changement de moules si nécessaire**

# Spécification

- Injection de pièces plastiques par lot
- 32 machines d'injection en parallèle
- 600 moules différents
  - Incompatibilité moule - machine  
Pression d'injection
- Chaque lot de pièces
  - Due date
  - Temps de traitement
  - Un moule spécifique
  - Temps de changement de moule

## Objectifs : minimiser

- Les retards
- Le nombre de changements de moule

**Changement de moules si nécessaire**

**Problème de lot-sizing et scheduling**

# Exemple

Código	PrzRsrv	QtdRsrv	Código injeção	Molde	Montagem	Quantidade	Tempo de processamento
031021005844	31-mai-03	12000	031021005844	102	1,33	12000	10,8
031023005846	09-jun-03	6300	031023005846	102	1,33	6300	5,67
031080000113	10-jun-03	25200	031080000113	108	6	25200	17,388
031192000601	10-jun-03	400	031192000601	119	1,5	400	0,584
033180003814	03-jun-03	35100	033180003814	318	1,66	35100	30,888
033180003814	10-jun-03	300	033180003814	318	1,66	300	0,264
033180003814	11-jun-03	14400	033180003814	318	1,66	14400	12,672
033180003814	11-jun-03	25200	033180003814	318	1,66	25200	22,176
033672005102	06-jun-03	350	033672005102	367	2	350	0,4375
033672005102	10-jun-03	7000	033672005102	367	2	7000	8,75
033705204689	09-jun-03	17300	033705204689	370	0,66	17300	30,794
050675304921	05-jun-03	1400	050675304921	067	0,5	1400	2,66
050681304922	30-mai-03	1512	050681304922	068	0,5	1512	2,9484
050681304922	09-jun-03	1080	050681304922	068	0,5	1080	2,106
050682304923	08-jun-03	1368	050682304923	068	1	1368	5,34888
050682304923	08-jun-03	1368	050682304923	068	1	1368	5,34888
085100103973	02-jun-03	1300	085100103973	510	2	1300	9,035
085100103973	03-jun-03	1300	085100103973	510	2	1300	9,035

# Algorithme de liste

---

## Algorithme 3 : Algorithme de liste pour le problème d'injection plastique

---

**Données :** List of jobs  $(Y_i)_{i \in \{1, N\}}$

- 1 Processing time of all jobs
  - 2 **pour tous les  $i$  faire**
  - 3     Order the machines according to their release date
  - 4     First machine
  - 5     **tant que** *Job  $Y_i$  is not assigned* **faire**
  - 6         **si** *Job  $Y_i$  and the machine are compatible* **alors**
  - 7             **si** *The needed mold is available* **alors**
  - 8                 **si** *The actual used mold on the machine is the good one* **alors**
  - 9                     └ Actualize the release date of the machine without setup
  - 10                     **sinon**
  - 11                     └ Actualize the release date of the machine with setup
  - 12             Assign the job
  - 13             **sinon**
  - 14                 Assign the job to the machine which uses the needed mold
  - 15                 Actualize the release date of that machine, taking into
  - 16                 account the setup if needed
  - 16     Next machine
-

# Fonction objectif

Valeur du retard total :

$$\sum_{i=1}^{\text{nombre de jobs}} \max(\text{date effective}_i - \text{due date}_i; 0)$$

Nombre de setups non considéré

## Résultats

- Instances générées à partir des données historiques de l'entreprise
  - Temps de traitement : distribution exponentielle de moyenne 10.75 heures
  - Due dates : distribution uniforme entre 24 et 312 heures
  - Démontage entre 15 et 45 minutes ; montage entre 20 et 60 minutes
  - 2 à 10 machines, 16 à 63 moules, 47 à 191 jobs

Machines	Current approach		Proposed approach			
	Tardiness	Setup	Tardiness	Setup	Tardiness	Setup
2	556.55	19	131.96	17	<b>96.04</b>	18
2	166.52	17	<b>80.76</b>	20	<b>80.76</b>	19
3	159.6	23	136.29	33	<b>66.16</b>	27
3	8.32	16	<b>0</b>	33	<b>0</b>	31
3	37.76	26	24.37	40	<b>17.98</b>	42
5	165.9	28	52.56	39	<b>46.17</b>	43
5	77.8	33	0.98	49	<b>0</b>	41
5	395	37	241.26	49	<b>148.63</b>	44
10	580.2	83	786.18	122	<b>579.5</b>	124
10	1020.4	82	963.95	114	<b>343.82</b>	101

35% de réduction des retards

# Sommaire

- 1 Outil d'aide à la décision générique et modulaire
- 2 Applications
  - Niveau tactique : application hospitalière
  - Niveau opérationnel : injection plastique
  - Niveau opérationnel : ordonnancement avec contraintes de précédence
- 3 Usine du futur
- 4 Conclusion

# Spécification

- Produits de réfrigération industrielle pour l'industrie de la restauration et de l'hôtellerie
- Process : coupage et pliage de feuille métallique par des presses
- **Un produit : passage par plusieurs presses en séquence**
- Plan de production hebdomadaire : produit, date, quantité
- 4 niveaux de priorité
- Temps de setups considérables
  - Temps de process pour un produit : quelques secondes
  - Temps de setups : quelques minutes

# Industrie du futur

Niveau stratégique :

- Dimensionner les systèmes pour les prochaines années
- Déterminer le nombre de ressources nécessaires
- Mais variabilité dans le mix-produit et les quantités
- Systèmes de production flexibles, agile, reconfigurable, changeable, etc.

# Agilité et flexibilité

- Globalisation, variabilité des volumes et de la variété de produit
- Temps de vie des produits court, haut degré de personnalisation
- Implantation reconfigurable : "the change of an existing plant configuration to another that optimizes costs and time"  
[Lacksonen and Hung, 1997]

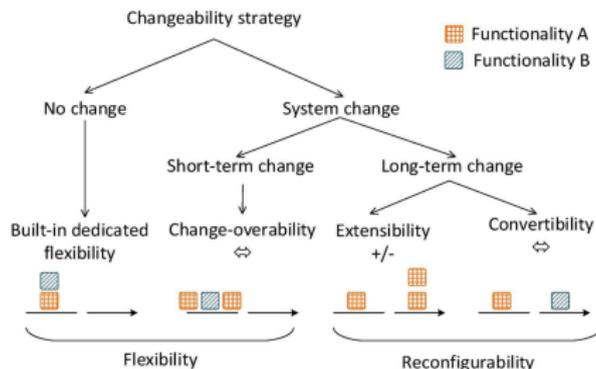


FIGURE 5 – [Benkamoun et al., 2015]

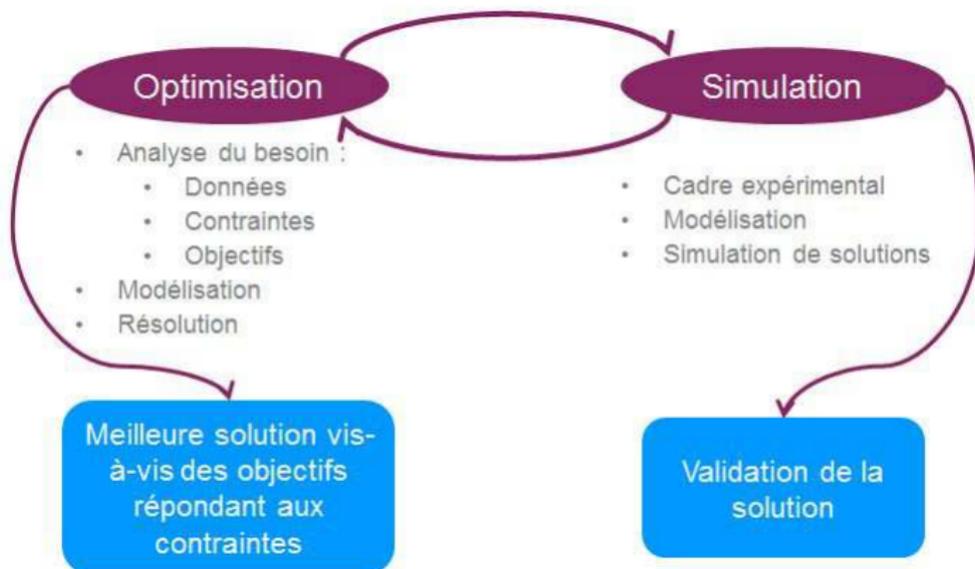


FIGURE 6 – Couplage optimisation - simulation

## Robotique collaborative

- Travail collaboratif homme - robot : fin des barrières de sécurité
- Robots moins imposants : mobilité des robots
- Robots facilement reconfigurables  
Changement de programme et non plus changement d'outils

### Caractéristiques :

- Meilleure compatibilité
- Moins de temps de setup
- Ressources mobiles
- Ressources plus petites



FIGURE 7 – Robot collaboratif mobile KMRiiwa

Exploitation de ces nouveaux outils dans nos systèmes de production reconfigurables

# Big data

- Émergence de nouvelles technologies :  
Internet des objets, RFID, Cloud Computing, Appareils connectés mobiles
- Énormément d'informations disponibles par les entreprises
- Futur Manufacturing Execution Systems :  
Décentralisé, intégré verticalement (supply chain), mobile, connecté, utilisant le cloud computing [Almada-Lobo, 2016]
- Problématiques à considérer :
  - Comment collecter les données disponibles ?
  - Comment les traiter et/ou les exploiter ?

## Développement de notre outil en cohérence avec le Big Data

Alimentation de notre outil par le Big Data : meilleure description

Alimentation du MES par notre outil : ordonnancement au jour le jour

# Conclusion

- Objectif : proposer un outil d'aide à la décision générique en limitant les étapes spécifiques au problème considéré

# Conclusion

- Objectif : proposer un outil d'aide à la décision générique en limitant les étapes spécifiques au problème considéré
- Outil déjà testé pour des problèmes statiques
  - [Klement et al., 2017]
  - [Silva et al., 2016]

# Conclusion

- Objectif : proposer un outil d'aide à la décision générique en limitant les étapes spécifiques au problème considéré
- Outil déjà testé pour des problèmes statiques
  - [Klement et al., 2017]
  - [Silva et al., 2016]
- Problème avec contraintes de précédences en cours de résolution

# Conclusion

- Objectif : proposer un outil d'aide à la décision générique en limitant les étapes spécifiques au problème considéré
- Outil déjà testé pour des problèmes statiques
  - [Klement et al., 2017]
  - [Silva et al., 2016]
- Problème avec contraintes de précédences en cours de résolution

# Perspectives

- Amélioration de l'outil
  - Métaheuristiques à population
  - Travail sur des problèmes de la littérature pour comparaison CLSP, DLSP, etc.

# Conclusion

- Objectif : proposer un outil d'aide à la décision générique en limitant les étapes spécifiques au problème considéré
- Outil déjà testé pour des problèmes statiques
  - [Klement et al., 2017]
  - [Silva et al., 2016]
- Problème avec contraintes de précédences en cours de résolution

# Perspectives

- Amélioration de l'outil
  - Métaheuristiques à population
  - Travail sur des problèmes de la littérature pour comparaison CLSP, DLSP, etc.
- Systèmes de production reconfigurables
  - Facilement adaptable à la variabilité des produits et des quantités
  - Problématique intéressant de nombreuses entreprises



Merci de votre attention

[nathalie.klement@ensam.eu](mailto:nathalie.klement@ensam.eu)

+33(0)3 20 62 27 69



Almada-Lobo, F. (2016).

The industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES).  
*Journal of Innovation Management*, 3(4) :16–21.



Benkamoun, N., Kouiss, K., Huyet, A.-L., et al. (2015).

An intelligent design environment for changeability management - application to manufacturing systems.  
*In DS 80-3 Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15) Vol 3 : Organisation and Management, Milan, Italy, 27-30.07. 15.*



Gourgand, M., Grangeon, N., and Klement, N. (2014).

Activities planning and resource assignment on multi-place hospital system : Exact and approach methods adapted from the bin packing problem.  
*In 7th International Conference on Health Informatics, Angers, France, pages 117–124.*



Klement, N., Gourgand, M., and Grangeon, N. (2017).

Medical imaging : Exams planing and resource assignment - hybridization of a metaheuristic and a list algorithm.  
To appear in 10th International Conference on Health Informatics, 2017.



Lacksonen, T. A. and Hung, C.-Y. (1997).

Project scheduling algorithms for re-layout projects.  
*IIE transactions*, 30(1) :91–99.



Silva, C., Klement, N., and Gibaru, O. (2016).

A generic decision support tool for lot-sizing and scheduling problems with setup and due dates.  
*In International Joint Conference - CIO-ICIEOM-IIE-AIM (IJC 2016), San Sebastian, Spain. ICIEOM.*