



**UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD**

# Etat de l'art sur les algorithmes génétiques appliqués à la résolution de problèmes de permutation

**Marie-Ange MANIER\*, Christelle BLOCH**

Journées de travail 26-27 septembre 2017:  
Modèles et Algorithmes pour l'ordonnancement

*Groupe en Ordonnancement Théorique et Appliqué (GOThA) – GDR RO et GT Bermudes - GDR RO et GDR MACS*

\* Université de Technologie de Belfort Montbéliard, Equipe OPERA, Belfort, [marie-ange.manier@utbm.fr](mailto:marie-ange.manier@utbm.fr)

# Contexte : Problèmes de permutation issus de projets réels

- **Définition :**

trouver 1 permutation  $\pi = a_1 a_2 \dots a_n$

arrangement d'un ensemble fini d'éléments  $N = \{e_1; e_2; \dots; e_n\}$

qui minimise 1 ou plusieurs critères

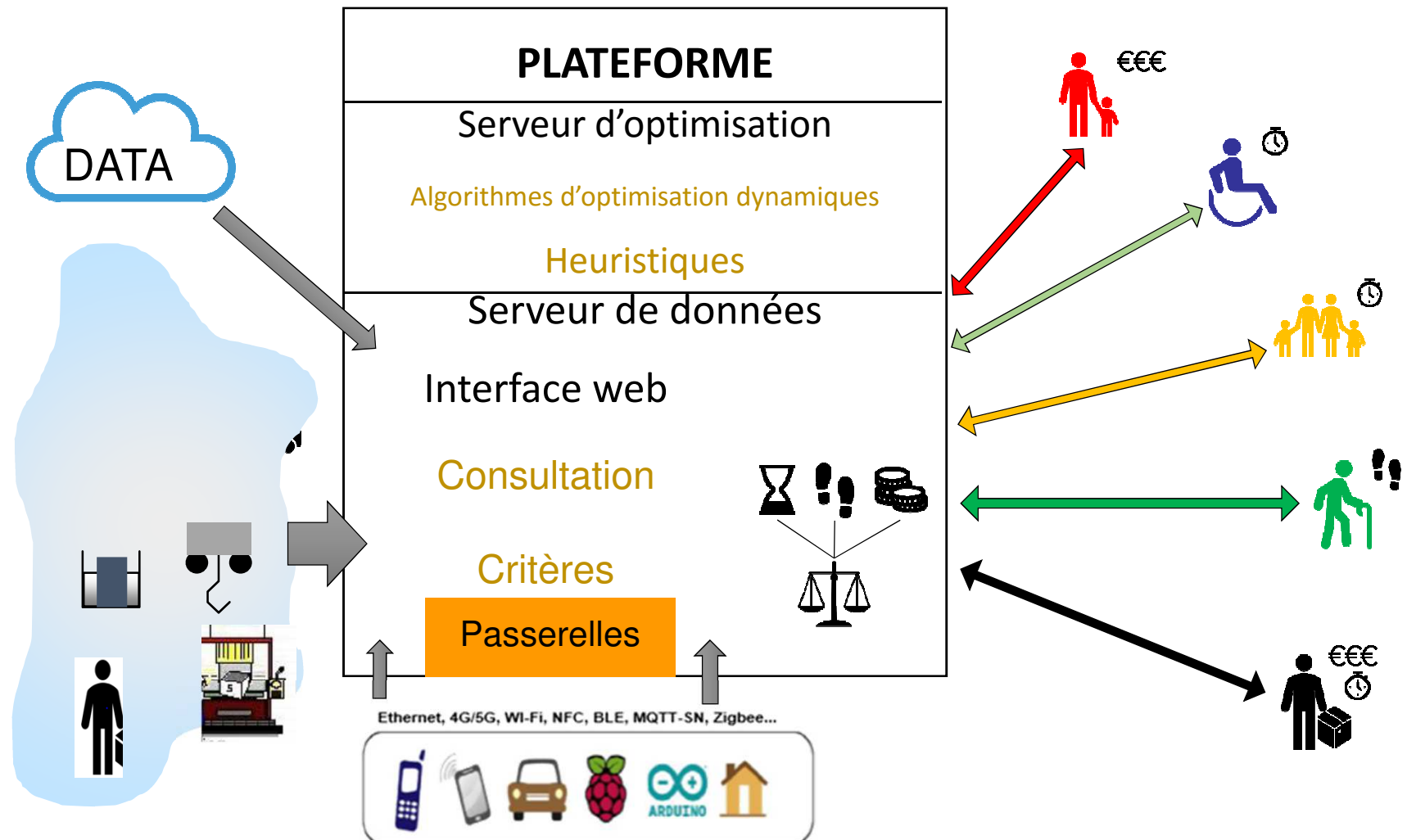
- **Complexité et diversité des champs d'application**

*Ordonnancement, Transport, Affectation...*

- **Contraintes et objectifs des acteurs du projet**

Nombreux - Spécifiques

En fortes évolutions (Transformation numérique, durable ...)



# Exemple (Ordonnancement)

Contexte : atelier de traitement de surface  
Problème : Hoist Scheduling Problem

Objectif : Déterminer un ordonnancement qui maximise la productivité tout en assurant des produits de qualité.



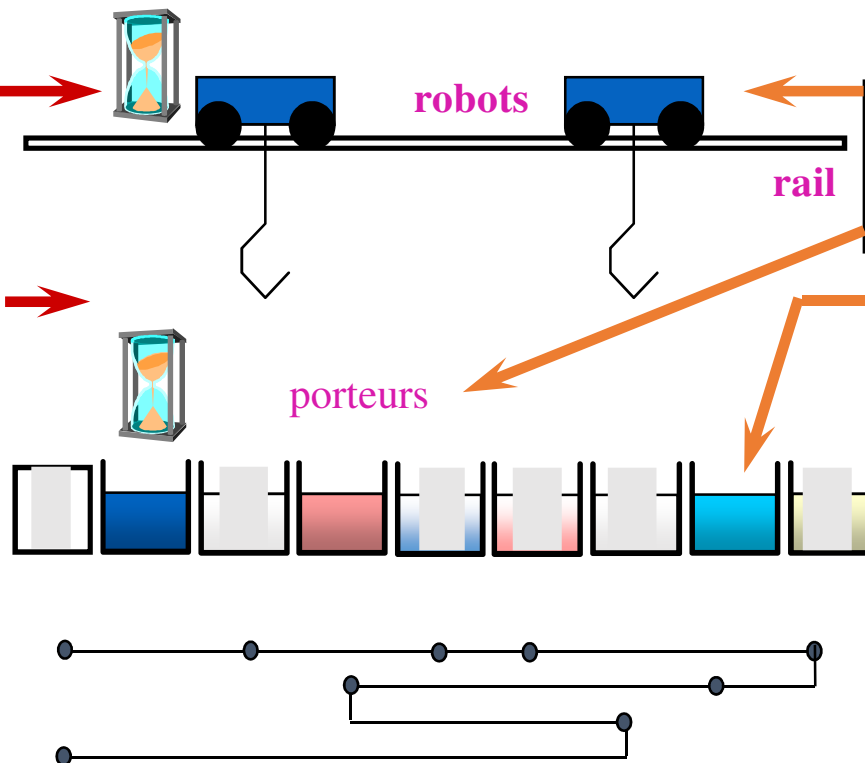
**Contraintes spatiales :**  
risques de collisions entre robots

**Contraintes temporelles :**

- temps de déplacement non négligeables devant les durées opératoires
- durées opératoires bornées [ Min, Max ]



**Contraintes de ressources :**  
capacité limitée



**Contraintes d'antériorité :**

- gamme(s) opératoire(s)

**Ni stock  
ni attente  
ni préemption**

# Exemple (Routing)

## Contexte : Ville intelligente



- Logistique rationalisée
- Economies d'échelles
- Réduction gaspillage
- Mobilité facilitée
- Bien-être du citoyen
- Environnement
- Smart building

# Exemple (Routing)

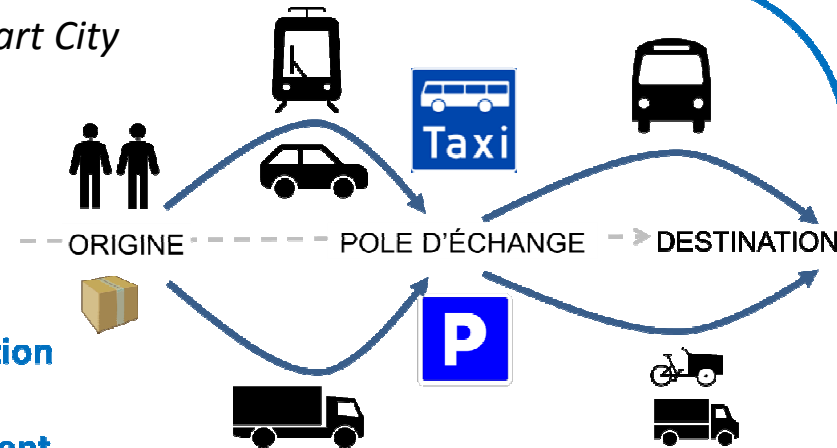
Contexte : Ville intelligente

## Projet MISC - Mobility In Smart City

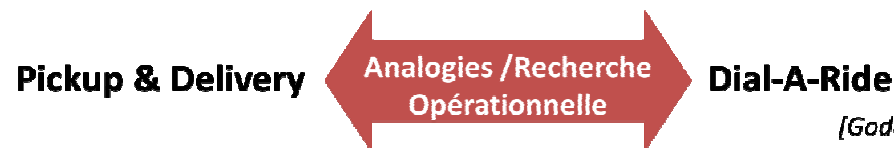
### Quoi ?

Proposer de nouvelles offres de services de mobilité connectés et dynamiques

- **Collaboration-Mutualisation-Synchronisation**
- modes individuels/collectifs
  - itinéraires/transferts/stationnement...



**Pour qui ?** Pour les **marchandises** et/ou les **personnes**



[Godart et al, ROADEF 2017]  
[Godart et al, FuturMob 2017]

**Comment ?** plate-forme : optimisation (R.O.) + Internet des objets (IoT)  
**Problèmes dynamiques, sélectifs, avec contraintes de synchronisation spatiales et temporelles**

# Problématique :

## Prise en compte de ces contraintes dans des méthodes approchées

- Difficultés :
  - Contraintes multiples : Rareté des solutions faisables
  - Données « as a service » (objets connectés)
    - Explosion des volumes de données
    - Dynamique Forte et Horizons de décision courts
- Conception de métaheuristiques adaptées

# Différents verrous de conception

- Schéma général et réglage de paramètres

- Représentation (modèle / encodage) des solutions
- Mécanismes / opérateurs de génération de solutions
- Evaluation des objectifs (modèle, simulation)
- Intégration/Gestion de la satisfaction des contraintes
- Processus de sélection

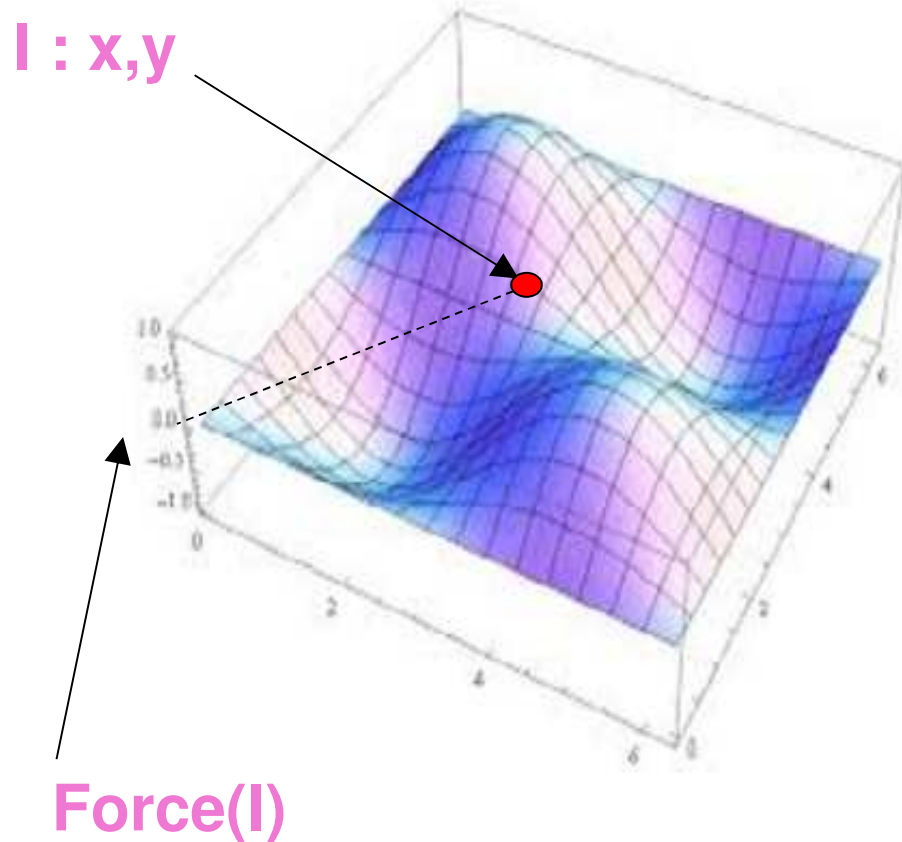


**définissent la taille, la topologie, le mode de parcours  
de l'espace de recherche**

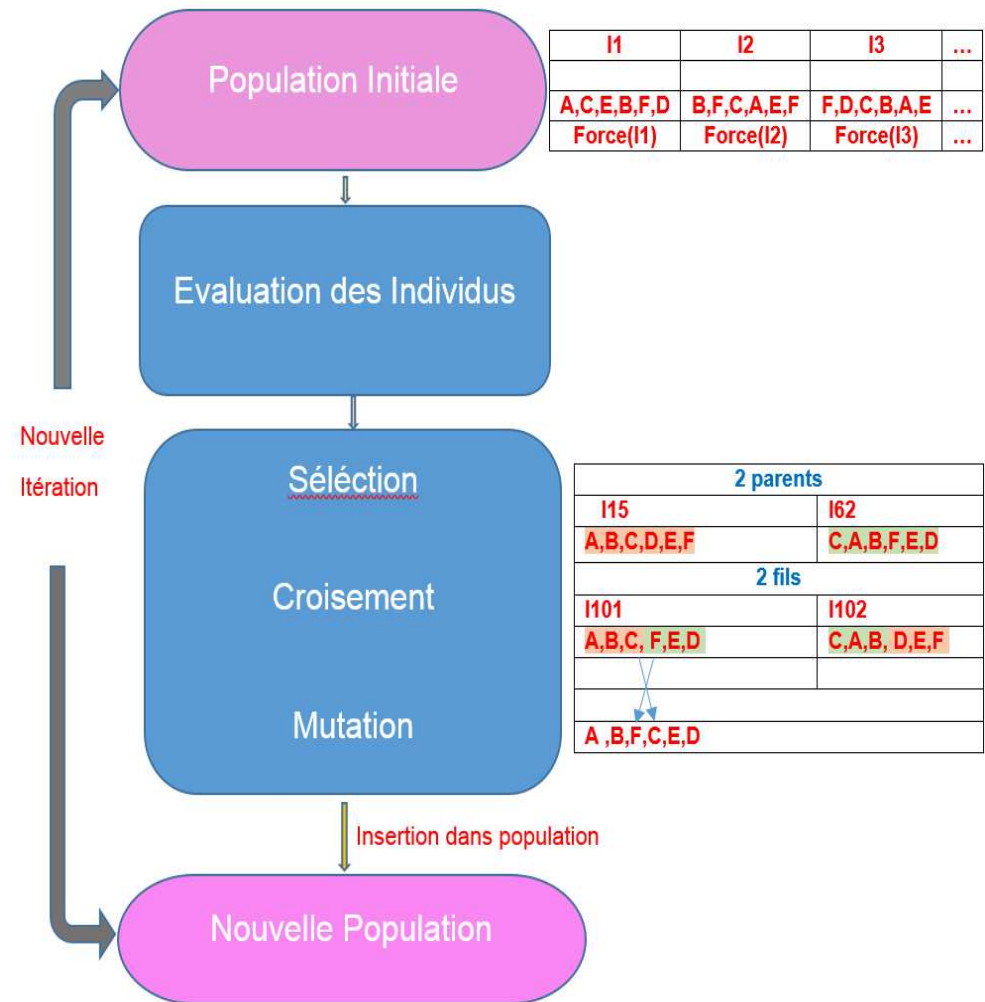


# Différents verrous de conception

- Exemple : algorithmes évolutionnaires



Exemple d'espace de recherche (2D, problème continu) [1]



Exemple de schéma d'évolution [2]

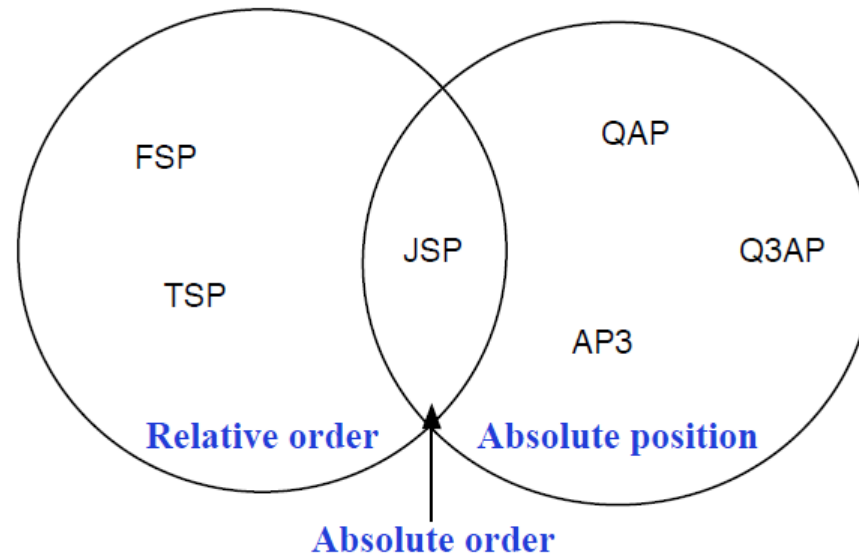
# Différents verrous de conception

- Equilibre entre Exploration (diversification)  
et Exploitation (convergence)
- Fortement dépendant
  - de la classe de problème de permutation
  - des processus d'évaluation possibles
  - du « mapping » monde réel  $\Leftrightarrow$  modèle  
(phénotype  $\Leftrightarrow$  génotype)
  - des propriétés de la relation entre espace  
des variables  $\Leftrightarrow$  des objectifs

(Rothlauf, 2014)

# Classes de problèmes

- Classification de Mehdi, 2011



- Travaux de (Djerid, et al., 1996)(Portmann, et al., 2000)

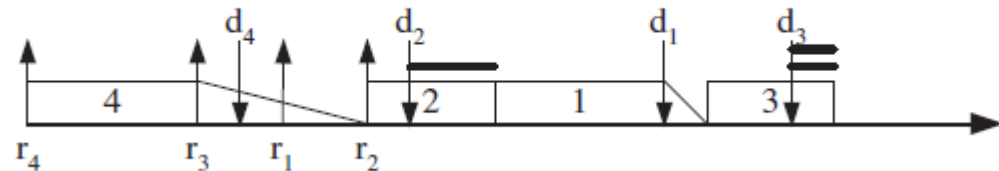
« ask the following question: for a given problem and for a given criterion, how define the genes' values or the links between the genes' values, so that a created individual is good and thus must be kept.»

- Routing problems : «edge-based»
- Scheduling problems : «position-based» / «precedence-based »
- Complex problems : Plusieurs de ces caractéristiques

# Classes de problèmes

- Complex problems : exemple

$$1 \mid r_i, d_i, S_{sd} \mid \sum w_i \bar{T}_i.$$



1-machine | plusieurs familles de produits, ready dates ( $r_i$ ), due dates ( $d_i$ ), temps de réglage dépendant de la séquence

(entre produits de familles différentes)

Critère à minimiser : sum of weighted tardiness

Caractéristiques à rechercher par l'algorithme génétique :

- pas ou peu de temps de réglage

&

- produits avec  $d_i$  courte / forte pénalité de retard à ordonnancer au plus tôt

Compromis entre arcs "intéressants" et ordres partiels "intéressants"

(liés aux temps de réglage)

(liés à l'urgence /aux pénalités )

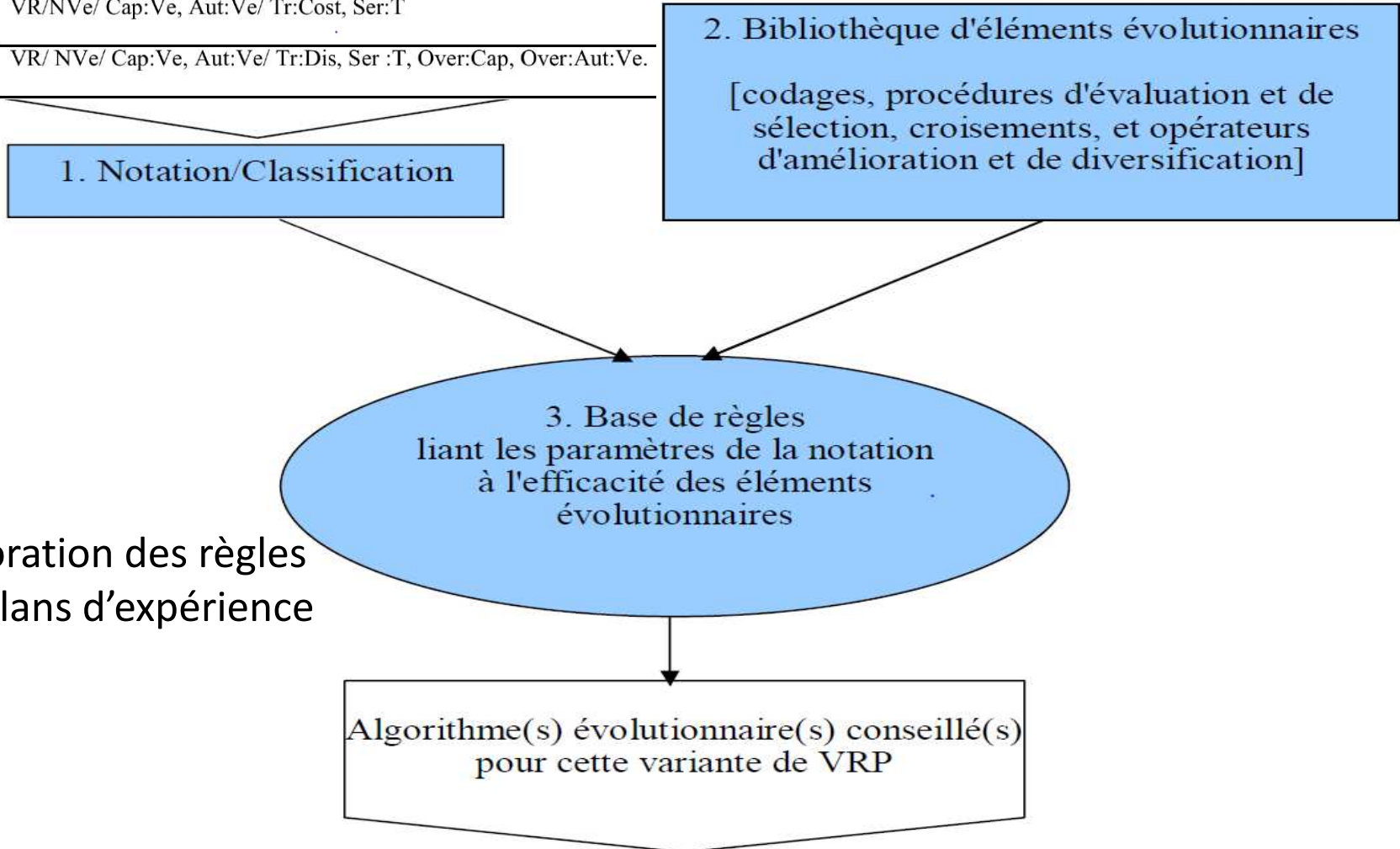
*edge-based*

*position-based*

# Liens entre caractéristiques des problèmes et conception des algorithmes évolutionnaires

- Travaux de (Haj Rachid, 2010) (Ramdane Cherif et al. 2015)

Acronym	Notation
VRP	VR/NVe/ Cap:Ve, Aut:Ve/ Tr:Cost, Ser:T
VRP	VR/ NVe/ Cap:Ve, Aut:Ve/ Tr:Dis, Ser :T, Over:Cap, Over:Aut:Ve.



# Liens entre caractéristiques des problèmes et conception des algorithmes évolutionnaires

- Travaux de (Djerid, et al., 1996) (Portmann, et al., 2000)

## Ensemble d'indicateurs

- mesurer comment chaque type de croisement conserve les « bonnes propriétés » des permutations « parentes »
- Edge Based, Precedence Constraint Based, and Position Based Indicators

## Analyses (théoriques et expérimentales)

pour plusieurs croisements classiques applicables sur les permutations

OX Operator  
(Davis, 1985)

ERX Operator  
(Whitley, Starkweather and Fuquay, 1989)

kX Operator  
(Caux, et al., 1995)  
(Djerid, et al., 1996)

1X Operator  
(Davis, 1985)

LOX Operator  
(Falkenauer and Bouffouix, 1991)

ARX and ARXM Operators  
(Djerid, 1997)

# Approche la plus classique

*La plus utilisée malgré les travaux des slides précédents*

- un problème à résoudre
- un schéma général simple :
  - Codage direct de permutation
  - Evaluation : calcul par méthode exacte, ou hybridation/simulation
  - Croisements dédiés aux permutations, en particulier pour
    - éviter les doublons,
    - transmettre les propriétés de précedence de parents à enfants
  - Mutations classiques ou dédiées, choisies avec soin (*!solutions non faisables*)
  - Sélection par roulette ou tournoi
- expérimentation sur un grand nombre de benchmarks connus
- comparaison en termes
  - \* d'objectif (distance aux solutions optimales connues)
  - \* de performance (tps de calcul, nbre de traitements élémentaires)

# Autres grands pans de la littérature

- Multiplication de la puissance de calcul

Parallélisation et distribution d'algorithmes

Centres de calcul surpuissants (mais énergivores)

Grids ...

- Réglage et/ou évolution dynamique des paramètres (Elaoud et al, 2010)

Exemple :   taux d'application (probabilités)

de couples (croisement, mutation)

en fonction des performances en termes d'objectifs

- Schéma général : notamment cas du multi-objectif

Parmi les plus célèbres : NSGA II (Deb et al, 2002)

Evaluation par ranking basée sur les fronts de Pareto courants  
et process de diversification intégré (sharing)

Un intérêt: Transformation de contraintes en objectifs



# Alternatives Possibles

- Différents types de représentation

Binaire, réels (random keys), arbre, Lehmer Code, matrices, ...

*(Knjazew and Goldberg, 2000), (Soukhal and Martineau, 2005: Flow Shop Robotic Cell)*

- Différents types d'évaluation

Méthodes exactes (PL, Algo. de Graphes, B&B...) *(Prins et al, 2004)*

Heuristiques (SBN, local search...)

Règles de dominance

Hybridation (recherche locale/simulation...)

- Différents modes de traitement des solutions infaisables

Suppression

Pénalisation *(Mingyong and Erbao, 2010: VRP-Simult.PDTW)*

Réparation *(Lin et al, 2013: resource constrained re-entrant FSSP)*

- Processus complémentaires variés (notamment de diversification)

Multi-start, *(Lacomme et al, 2015: VRP with route balancing)*

seeding techniques, ...

## Attention à l'élimination des solutions non faisables

*(Portmann and Vignier, 2008)*



**UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD**

# Exemples

# Exemple 1 : Problème routing: SPDPTWPD (Al Chami et al, 2017)

*Selective Pick up and Delivery with Time Windows and Paired Demands*

Projet ANR TCDU-Transport Collaboratif en Distribution Urbaine

## 1) Codage



## 2) Génération de population initiale

- par permutations aléatoires des noeuds
- composée de tournées faisables
- amélioration de chaque tournée (gène) par recherche locale puis insertion dans le chromosome

*local search procedure*: opérateur de mutation classique (swap de 2 noeuds-choix aléatoire)  
Test de toutes les permutations possibles. Si solution faisable ET de plus faible distance, elle remplace la précédente.

## 3) Ranking type NSGA

## 4) Fitness-based on sharing method

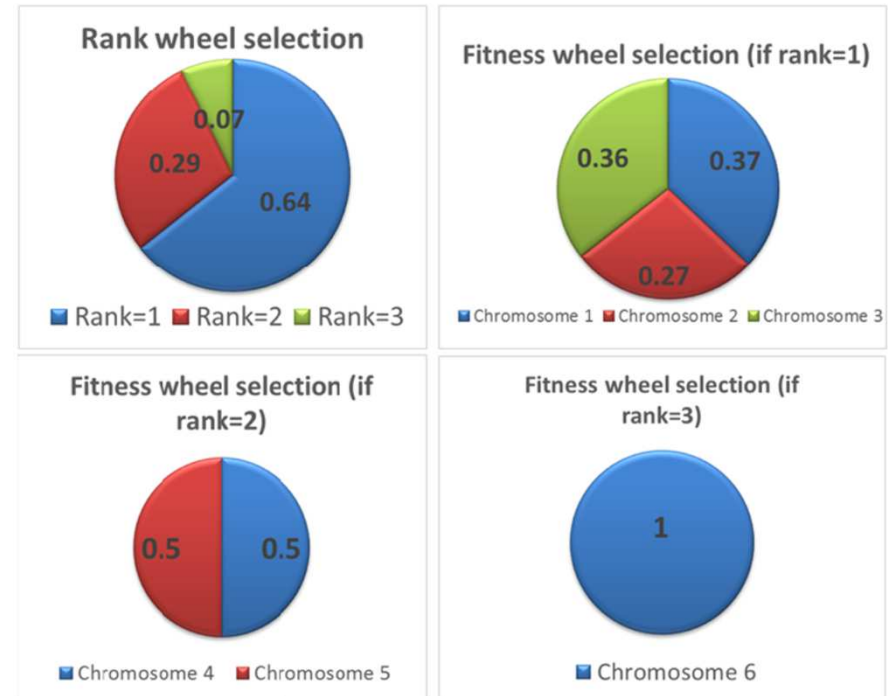
Avant sélection et pour amener de la diversité: dans chaque rang on classe les solutions suivant leur fitness => pénalisation des solutions suivant leur fitness dans les zones plus peuplées /denses (critère de distance ( $dist_{i,j}$ )) (diminue la proba de se retrouver dans la population suivante)  
 $fitness_i = rank_i / \sum (1 - dist_{i,j}/s)$   
(Goldberg and Richardson (1987))

⇒ Meilleure chance de selection pour les solutions dans les zones moins peuplées  
Distribution de la population sur le front de Pareto

## 5) Sélection

2 roulettes appliquées consécutivement:  
=> garder le côté aléatoire de la sélection tout en donnant plus de chances aux best solutions d'être choisies

- Roulette 1: choix du rang du parent (portion de roue proportionnelle).
- Roulette 2 pour ce rang, choix d'une solution (avec fitness: soit dans zone la moins dense)



## 6) Crossover operator

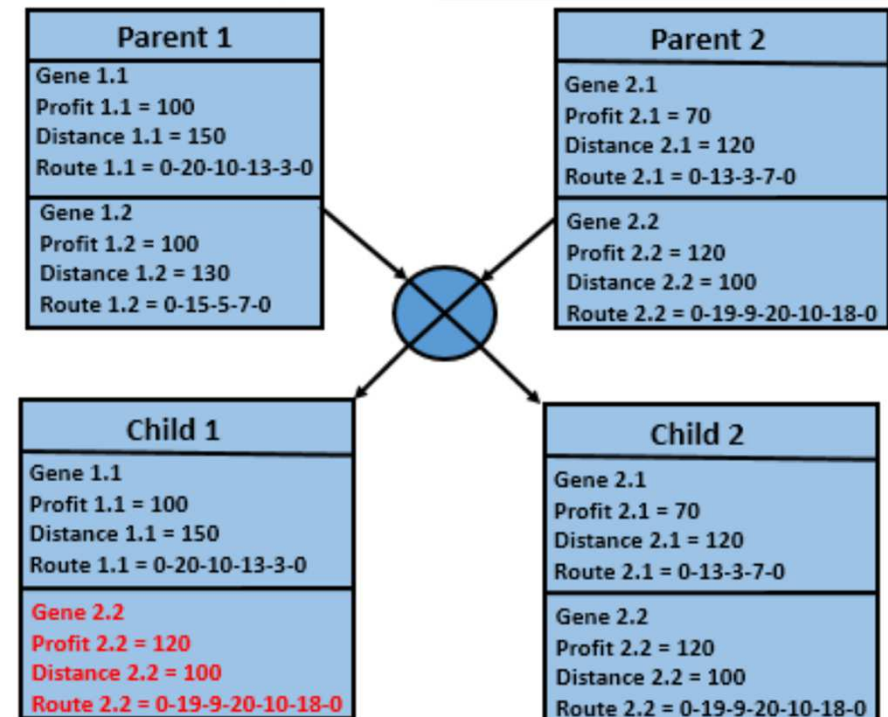
Idée: enfant 1 hérite des gènes de plus grand profit de ses parents

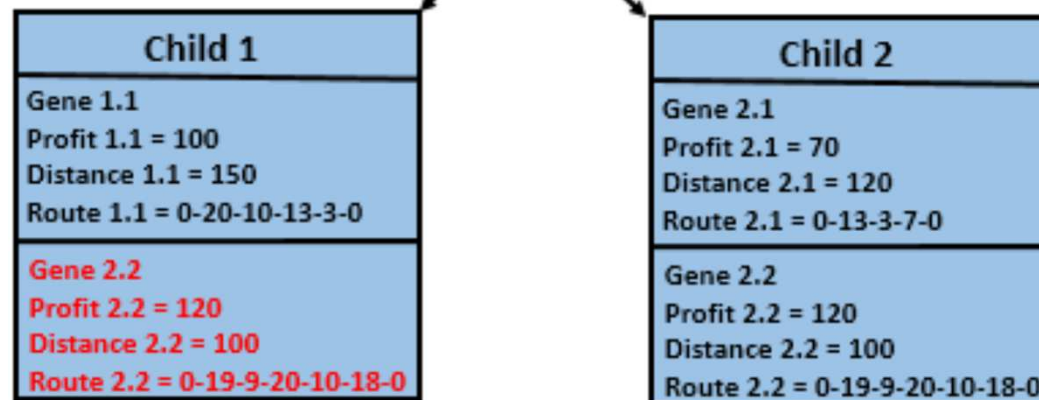
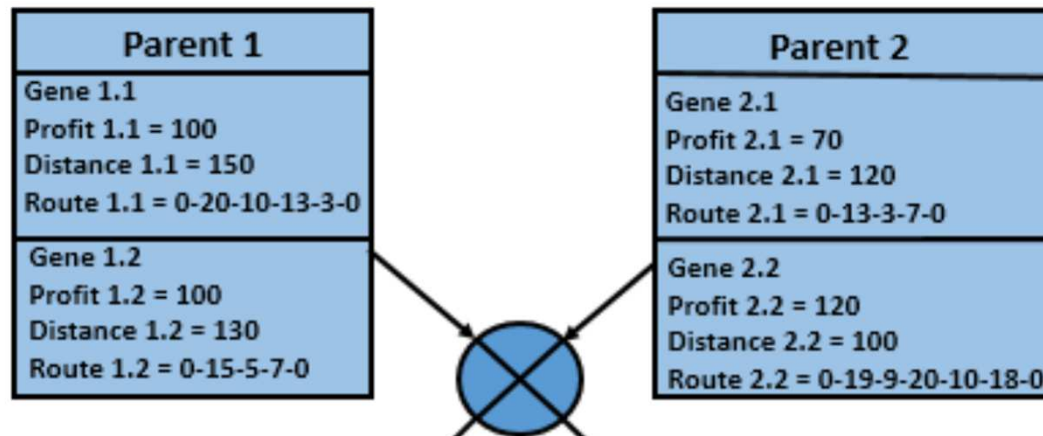
enfant 2: gènes de plus faible distance

Réparation si solution non faisable (gène apparaît 2 fois...)

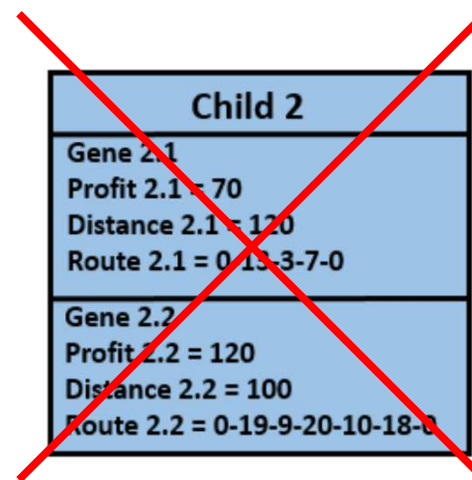
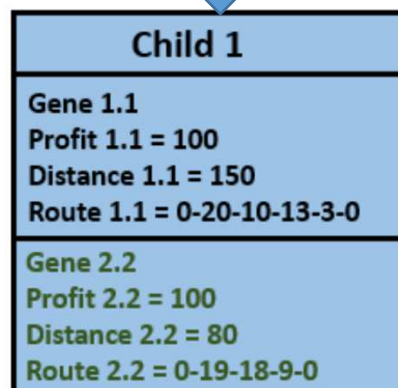
Amélioration par local search

Test de dominance: si l'enfant domine au moins 1 de ses parents, on le garde. Sinon il est détruit





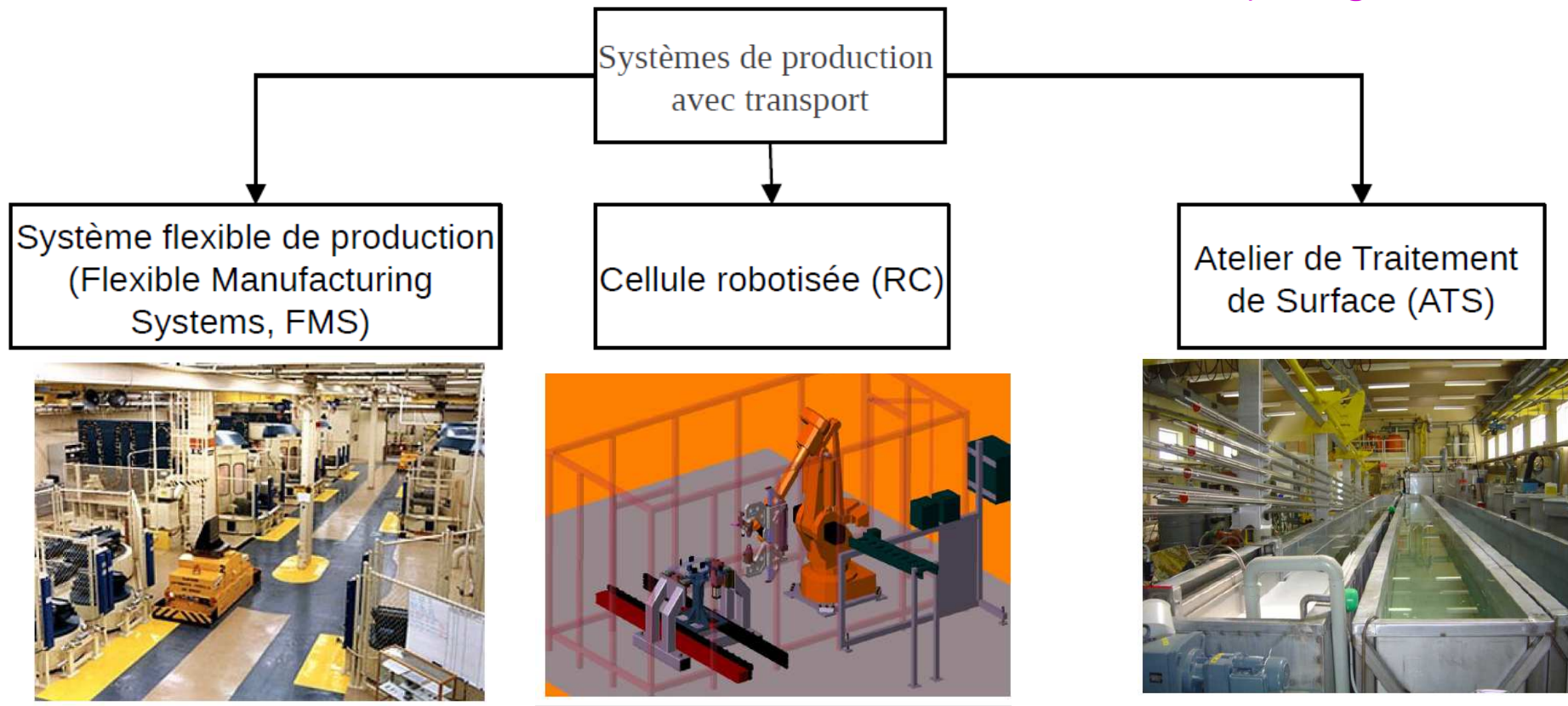
Réparation





## Exemple 2 : Problèmes d'ordonnancement complexes: avec ressources de transport

(Zhang et al, 2012)



**=> General Flexible Job Shop with Transportation**

temps bornés, avec ou sans stockage

affectation

temps transport

\* pour le Flexible Job Shop with Transportation

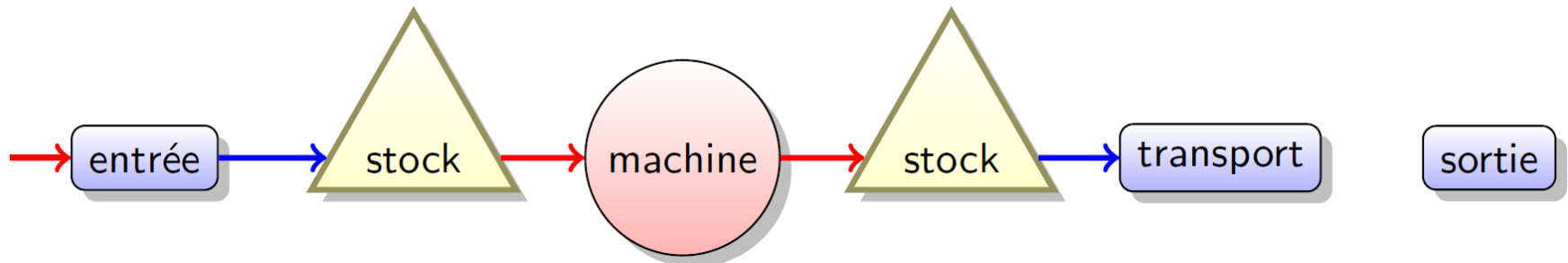
Mode de fonctionnement général:



$$J = J_1 \dots J_n$$

$$M = M_1 \dots M_m$$

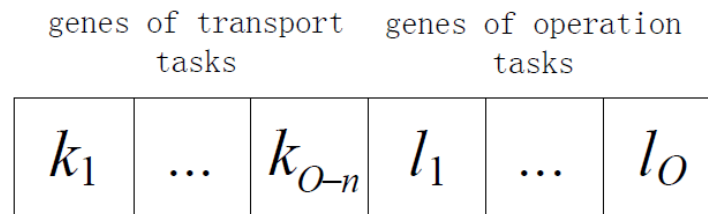
$$R = R_1 \dots R_r$$



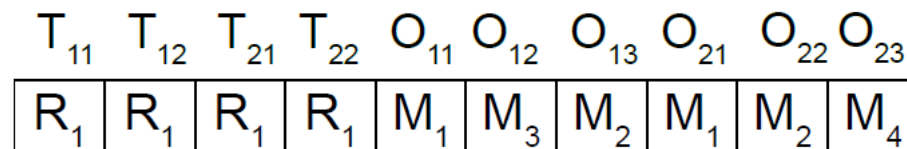
## exemples de codage

### \* pour le Flexible Job Shop with Transportation

Une solution = une séquence des opérations par machine  
+ une séquence des opérations par robot



Valeur d'un gène = ressource affectée



Procédures combinées:

- GA résout le problème d'affectation
- avec des heuristiques : GA+Tabou = GATS / GA+Tabou+SBN=GTSB



initialisation:

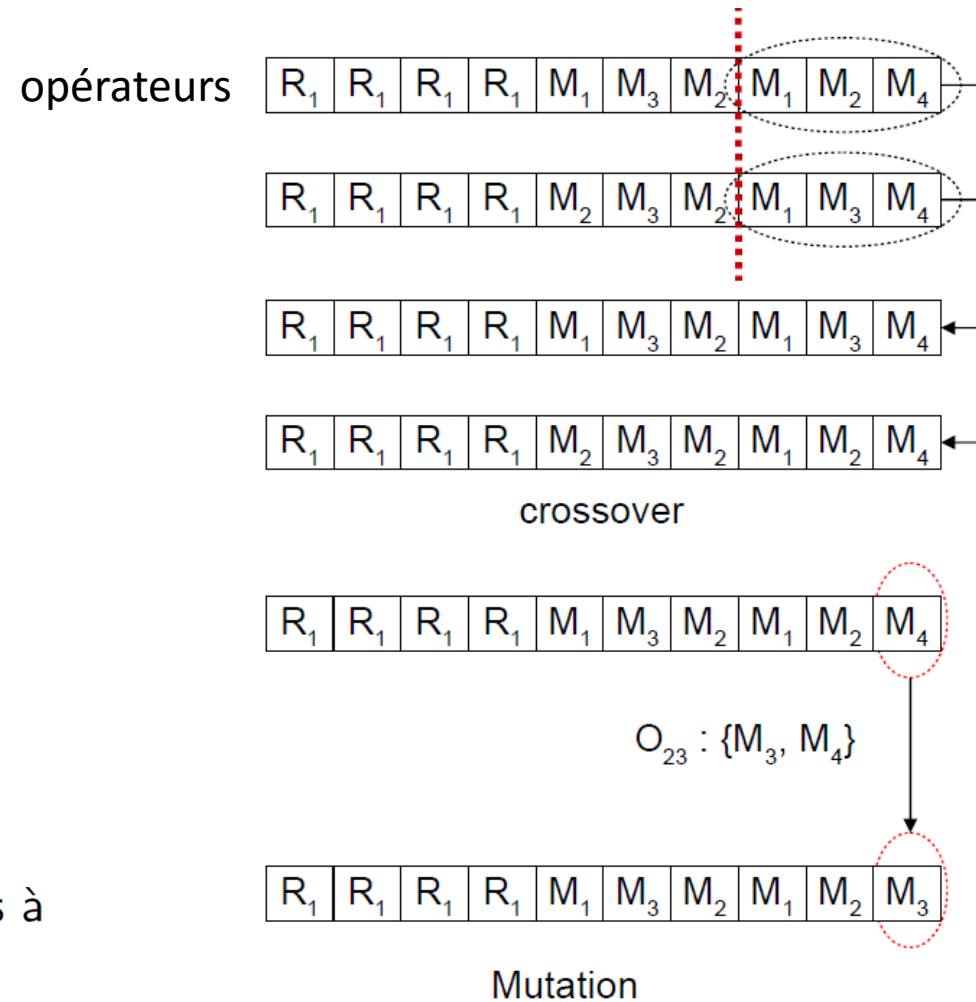
- affectation => chromosomes générés aléatoirement
- séquençement => SBN (faisable suivant les critères de makespan et stockage)

amélioration des séquences:

- Tabou : améliorer la solution courante pendant un certain nombre d'itérations
- SBN : remplacer les individus n'ayant pas évolué pendant un certain nombre de générations

réparation

- enlever les arcs conjonctifs associés à la séquence de la ressource goulet;
- tester les permutations d'une paire de tâches à partir de cette séquence;



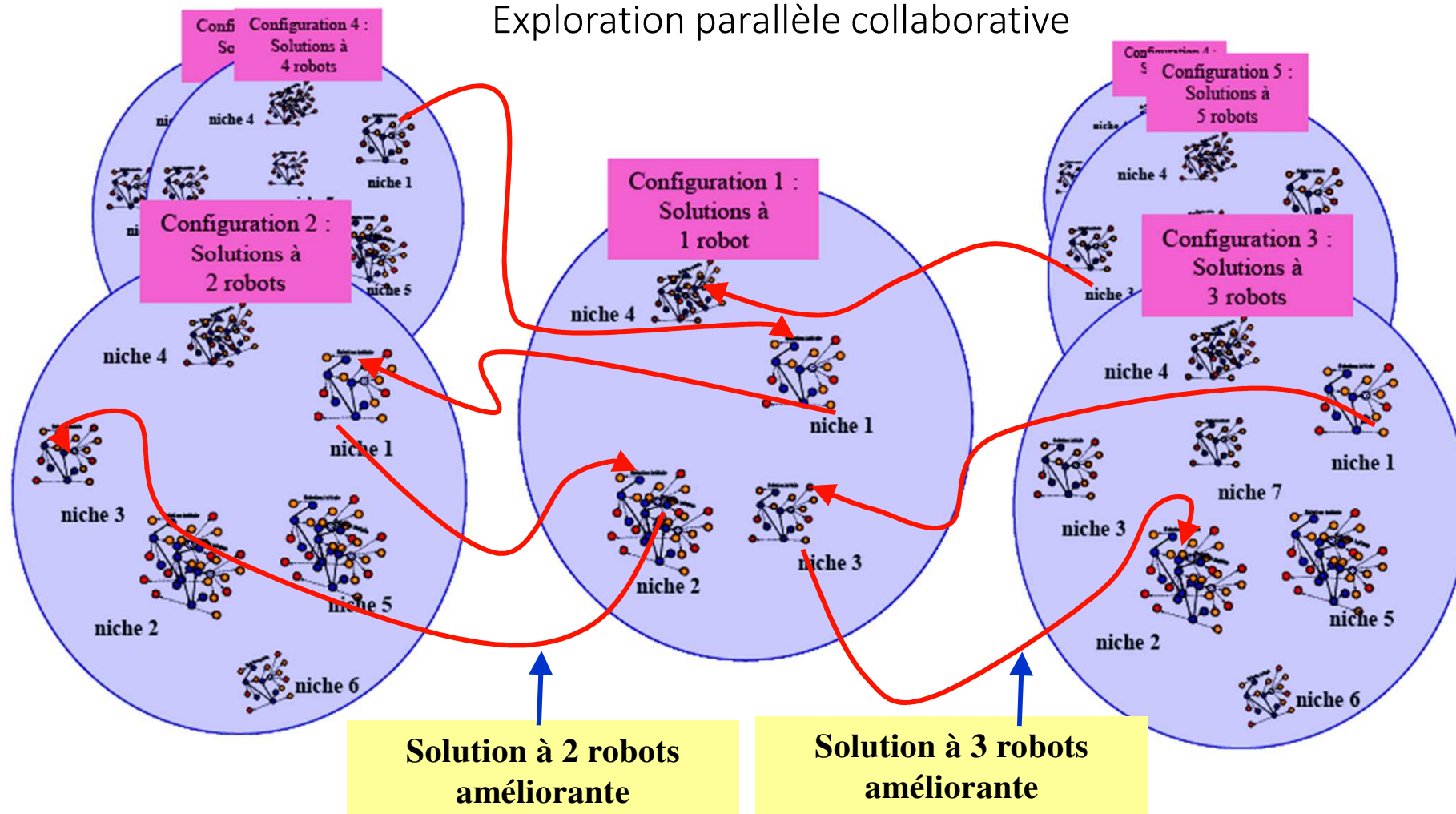
# Exemple 3 : Dimensionnement et Ordonnancement

(Lamrous and Manier, 2008)

(FSSP avec transport)

2 objectifs : Minimiser le nombre de robots ET maximizer la productivité

Recherche locale iterative /  
Exploration parallèle collaborative





**UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD**

# Conclusion

# Conclusion

Problèmes de permutation rencontrés dans les projets reels se caractérisent par :

- de plus en plus de contraintes spécifiques
- de plus en plus d'objectifs (notamment enjeux de l'économie durable)
- une très forte dynamique (objets connectés et big data)

Conception d'algorithmes génétiques capables de traiter le plus efficacement possible ces contraintes est un enjeu de plus en plus crucial

De nombreuses pistes identifiées mais garder à l'esprit

- les recommandations majeures (fondements, Goldberg, Rothlauf, ...)
- les recommandations plus spécifiques au "constraint handling"

+ éviter les process qui "empêchent d'atteindre certaines solutions, notamment les heuristiques ou pénalisation trop "puissantes"

Voir aussi) (Coello, 2016) : "Finding a "generic" technique, suitable for all kinds of problems, is very difficult. There is some knowledge available for each kind of problem."

Et (Paraskevopoulos, et al., 2016) : Survey "Resource constrained routing and scheduling"



**UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD**

**Merci !**





**UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD**

# Références

# Références

[1] <https://thinkingandcomputing.com/posts/crossover-genetic-algorithm-problems.html>

[2] <https://endomorphis.me/modele-de-parallelisme-en-iles-pour-des-metaheuristiques.htm>

Al Chami Z., Manier H., Manier M.-A., and Fitouri C., "A hybrid genetic algorithm to solve a multi-objective Pickup and Delivery Problem", IFAC World Congress (IFAC WC'17), Toulouse, France (july 2017).

Coello Coello, C.A.: Constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms. Conference Companion. pp. 563-587. GECCO '16 Companion, ACM, New York. NY, USA (2016), <http://doi.acm.org/10.1145/2908961.2926986>

Davis, L., 1985. Applying adaptive algorithms to epistatic domains. In: IJCAI. Vol. 85. pp. 162-164.

Deb K. , S. Agrawal, A. Pratap, T. Meyarivan, A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: Nsga-II., IEEE Trans. Evolutionary Computation 6 (2) (2002) 182-197.

Djerid, L., Portmann, M.-C., Villon, P., 1996. Performance analysis of permutation crossover genetic operators. Journal of Decision Systems 5 (1-2), 157-177.

Elaoud, S., Teghem, J., Loukil, T., 2010. Multiple crossover genetic algorithm for the multiobjective traveling salesman problem. Electronic Notes in Discrete Mathematics 36, 939-946.

Goldberg D. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley Professional, ISBN 978-0201157673, 1989.

Goldberg, D. E., Lingle, 1985. Alleles, loci, and the traveling salesman problem. In: Proceedings of an International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications. Vol. 154. Lawrence Erlbaum, Hillsdale, NJ, pp. 154-159.

Goldberg, D.E. and Richardson, J. (1987). Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization. In Genetic algorithms and their applications: Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms, 41{49. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.

Haj Rachid, M., 2010. Les problèmes de tournées de véhicules en planification industrielle: classification et comparaison d'opérateurs évolutionnaires. Ph.D. thesis, Université de Franche-Comté.

# Références

Holland J. H. *Adaptation In Natural and Artificial Systems*, Univ. of Michigan Press, 1975. In: *Proceedings of the 2016 on Genetic and Evolutionary Computation*

Kemmoe-Tchomte, S., Lamy, D., Tchernev, N., 2017. An effective multistart multi-level evolutionary local search for the flexible job-shop problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 62, 80-95.

Knjazew, D., Goldberg, D.E.: *Omega-ordering messy ga: Solving permutation problems with the fast messy genetic algorithm and random keys*. In: *Proceedings of the 2nd Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*. pp. 181-188. Morgan Kaufmann Publishers Inc. (2000)

Knjazew, D.: *OmeGA: A competent genetic algorithm for solving permutation and scheduling problems*, vol. 6. Springer Science & Business Media (2012)

Lacomme P., Prins, C., Prodhon, C., Ren L., 2015. A Multi-start split based path relinking (msspr) approach for the vehicle routing problem with route balancing. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 38, pp. 237-251.

Lamrous, S., and Manier, M.-A., "Recherches locales itératives parallèles pour l'ordonnancement d'ateliers de traitement de surface multi-robots ", *Neuvième Congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF'08)*, session Bermudes : Ordonnancement, Planification, Transport, Clermont-Ferrand, France, pp. 285-286 (25 au 27 février 2008).

Lin, D., Lee, C., Ho, W., 2013. Multi-level genetic algorithm for the resource-constrained re-entrant scheduling problem in the flow shop. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 26 (4), 1282-1290.

Manier, M.-A., and Lamrous, S., "An evolutionary approach for the design and scheduling of electroplating facilities", *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms (JMMA)*, Vol. 7, No2, pp. 197-215 (1 june 2008)  
<http://dx.doi.org/10.1007/s10852-008-9083-z>.

Mehdi, M., October 2011. *Parallel hybrid optimization methods for permutation based problems*. Ph.D. thesis, PhD Thesis, Distributed, Parallel, and Cluster Computing [cs.DC]. Univ. Lille 1, France (<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00841962/document>).

Michalewicz, Z., Schoenauer, M.: *Evolutionary algorithms for constrained parameter optimization problems*. *Evolutionary computation* 4(1), 1-32 (1996)



# Références

- Mohebifar A. New binary representation in Genetic Algorithms for solving TSP by mapping permutations to a list of ordered numbers, Proceedings of the 5th WSEAS Int. Conf. on Computational Intelligence, Man-Machine Systems and Cybernetics, Venice, Italy, November 20-22, pp. 363-367, 2006.
- Paraskevopoulos D. C., Laporte G., Repoussis P.P., and C.D. Tarantilis, Resource constrained Routing and scheduling : Review and research prospects, February 2016, CIRRELT-2016-03
- Portmann M.-C. , A. Vignier, Algorithmes génétiques et ordonnancement, Hermes Science Publications, Paris, 2001, pp. 95–130, ISBN 2-7462-0184-4.
- Portmann, M.-C., and Antony Vignier, 2000. Performances Study on crossover operators keeping good schemata for some scheduling problems. Proceedings of the Second Genetic & Evolutionary Computation Conference - GECCO'2000, Las Vegas, USA, Morgan Kaufmann, pp.331-338.
- Portmann, M.C., Vignier, A.: Genetic algorithms and scheduling. Production scheduling pp. 69-102 (2008)
- Prins, C., 2004. A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem. Computers & Operations Research 31 (12), 1985-2002.
- Ramdane-Cherif, W. R., Rachid, M. H., Bloch, C., Chatonnay, P., 2015. New notation and classification scheme for vehicle routing problems. RAIRO Operations Research 49 (1), 161-194.
- Rothlauf, F., 2014. Representations for evolutionary algorithms. In: Proceedings of the Companion Publication of the 2014 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation. GECCO Comp '14. ACM, New York, NY, USA, pp. 323-344.
- Soukhal A. , P. Martineau. : Resolution of a scheduling problem in a flowshop robotic cell, European Journal of Operational Research 161 (2005) 62–72
- Soukhal A., and P. Martineau. Resolution of a scheduling problem in a flowshop robotic cell. European Journal of Operational Research, 161(1) ; 62-72, 2005.
- Sudholt D. How crossover speeds up building-block assembly in Genetic Algorithms, Evolutionary Computation, 2015.

# Références

Whitley, L. D., Starkweather, T., Fuquay, D., 1989. Scheduling problems and traveling salesmen: The genetic edge recombination operator. In: ICGA. Vol. 89. pp. 133-40. 23

Zhang, Q., Manier, H., and, Manier, M.-A., "A Genetic Algorithm with Tabu search procedure for flexible job shop scheduling with transportation constraints and bounded processing times", Computers and Operations Research (COR), 39 (7), 1713–1723 (2012). <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2011.10.007>

Zhang, Q., Manier, H., and, Manier, M.-A., "A hybrid metaheuristic algorithm for Flexible Job-Shop scheduling problems with transportation constraints", Fourteenth international conference on Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2012), Philadelphia, USA, pp. 441-448 (7-11 july 2012), doi>10.1145/2330163.2330226.