

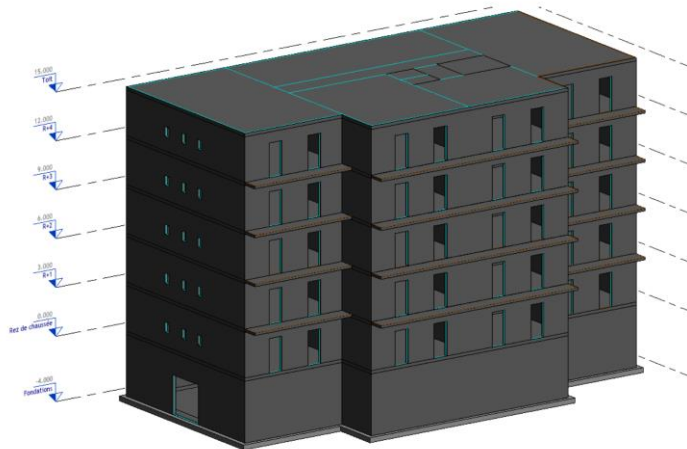
Optimisation du cyclage d'un ouvrage en béton armé via un algorithme génétique

Arthur Calvi¹, Xavier Jourdain¹, Farid Benboudjema¹

¹ Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CNRS

LMT – Laboratoire de Mécanique et Technologie

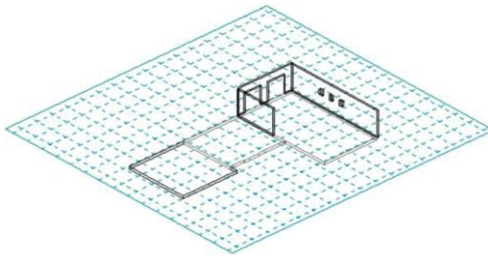
Contact : xavier.jourdain@ens-paris-saclay.fr



Problématique

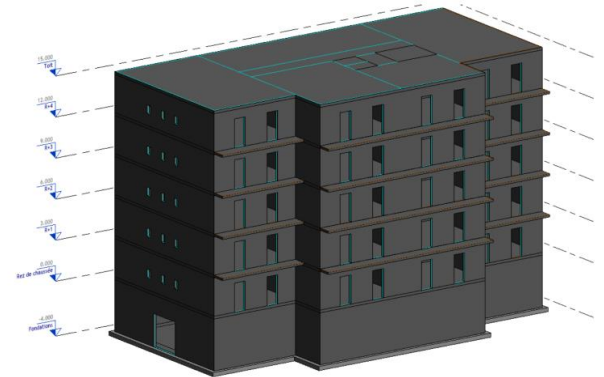
Optimiser le cyclage d'un ouvrage en béton armé

Organisation temporelle de la mise en œuvre des éléments structuraux (murs et dalles)



Exemple de cyclage

Bâtiment avec structure porteuse de type murs/dalles en BA



Éléments structuraux en béton armé d'un bâtiment d'habitation « standard »

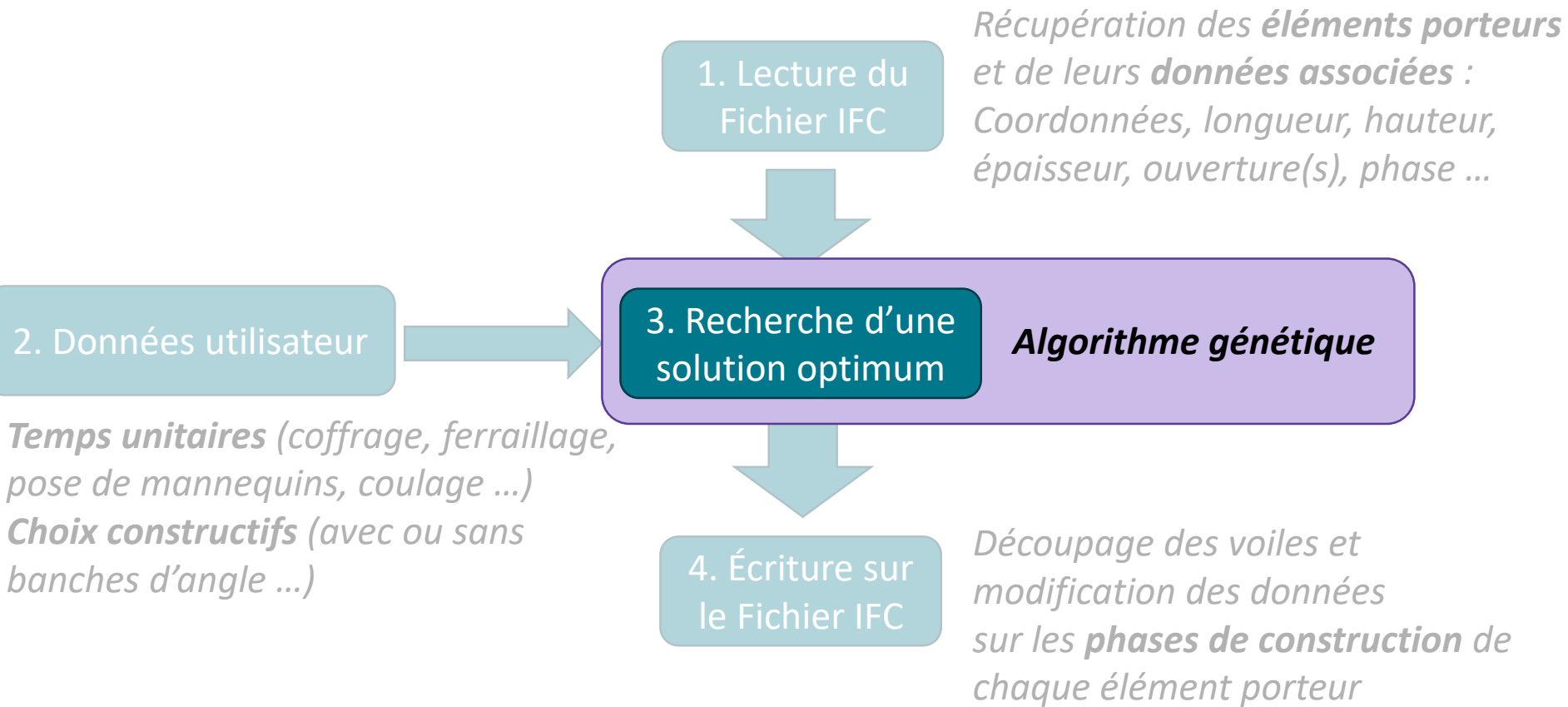
Optimiser le cyclage d'un ouvrage en béton armé

Mettre en place une méthodologie pour :

- Définir des solutions
- Faire évoluer ces solutions
- Choisir la meilleure

Nécessite une **évaluation** des solutions
via des **critères**

Méthodologie globale & Cadre de cette étude



Optimiser le cyclage d'un ouvrage en béton armé

2^e partie

Mettre en place une méthodologie pour :

- Définir des solutions
- Faire évoluer ces solutions
- Choisir la meilleure

1^{re} partie

Nécessite une **évaluation** des solutions
via des **critères**

Critères d'évaluation d'une solution

$$M_s = \frac{\gamma_1 C_{liss_mur} + \gamma_2 C_{liss_dalle} + \gamma_3 C_{liss_mannequin} + \gamma_4 C_{stab} + \gamma_5 C_{dist}}{\sum_{i=1}^n \gamma_i}$$

- Lissage du temps de réalisation des murs pour chaque phase
- Lissage du temps de réalisation des dalles pour chaque phase
- Lissage du nombre de mannequins utilisés pour chaque phase
- **Vérification de la stabilité**
- Calcul du temps de parcours des ouvriers par phase

Critères d'évaluation d'une solution – Cas de la stabilité

Matrice de constructibilité

- Diagonale = phase de réalisation de l'objet i
- Termes hors-diagonaux définis à partir des données du fichier IFC et de la phase de réalisation des murs et des dalles

$$\begin{array}{cccc} & \text{objet}_1 & \text{objet}_2 & \cdots & \text{objet}_n \\ \text{objet}_1 & a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,n} \\ \text{objet}_2 & a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{objet}_n & a_{n,1} & a_{n,2} & \cdots & a_{n,n} \end{array}$$

$$a(i, j) = \begin{cases} \text{Phase}(\text{objet } i) & \text{si } i = j \\ 1 & \text{si } \text{objet}_i \text{ et } \text{objet}_j \text{ sont côte à côte} \\ 3 & \text{si } \text{objet}_i \text{ est une dalle inférieure par rapport au mur } \text{objet}_j \\ -3 & \text{si } \text{objet}_i \text{ est une dalle supérieure par rapport au mur } \text{objet}_j \end{cases}$$

=> Basé sur les travaux de [Faghihi et al. 2014] sur des bâtiments à ossature métallique

Critères d'évaluation d'une solution

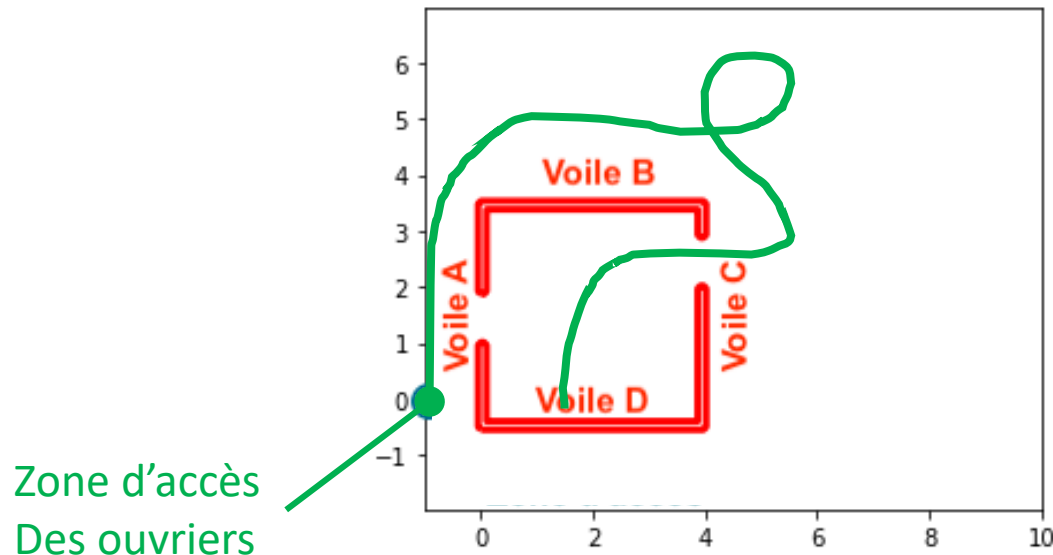
$$M_s = \frac{\gamma_1 C_{liss_mur} + \gamma_2 C_{liss_dalle} + \gamma_3 C_{liss_mannequin} + \gamma_4 C_{stab} + \gamma_5 C_{dist}}{\sum_{i=1}^n \gamma_i}$$

- Lissage du temps de réalisation des murs pour chaque phase
- Lissage du temps de réalisation des dalles pour chaque phase
- Lissage du nombre de mannequins utilisés pour chaque phase
- Vérification de la stabilité
- Calcul du temps de parcours des ouvriers par phase

Critères d'évaluation d'une solution – Cas du trajet des ouvriers

Exemple d'application :

- Salle avec 4 murs à réaliser (A, B, C et D)
- Quel trajet optimal pour **accéder à la face interne du mur à construire** (mur D) et ainsi pouvoir fermer les banches ?



Zone d'accès
Des ouvriers

Critères d'évaluation d'une solution – Cas du trajet des ouvriers

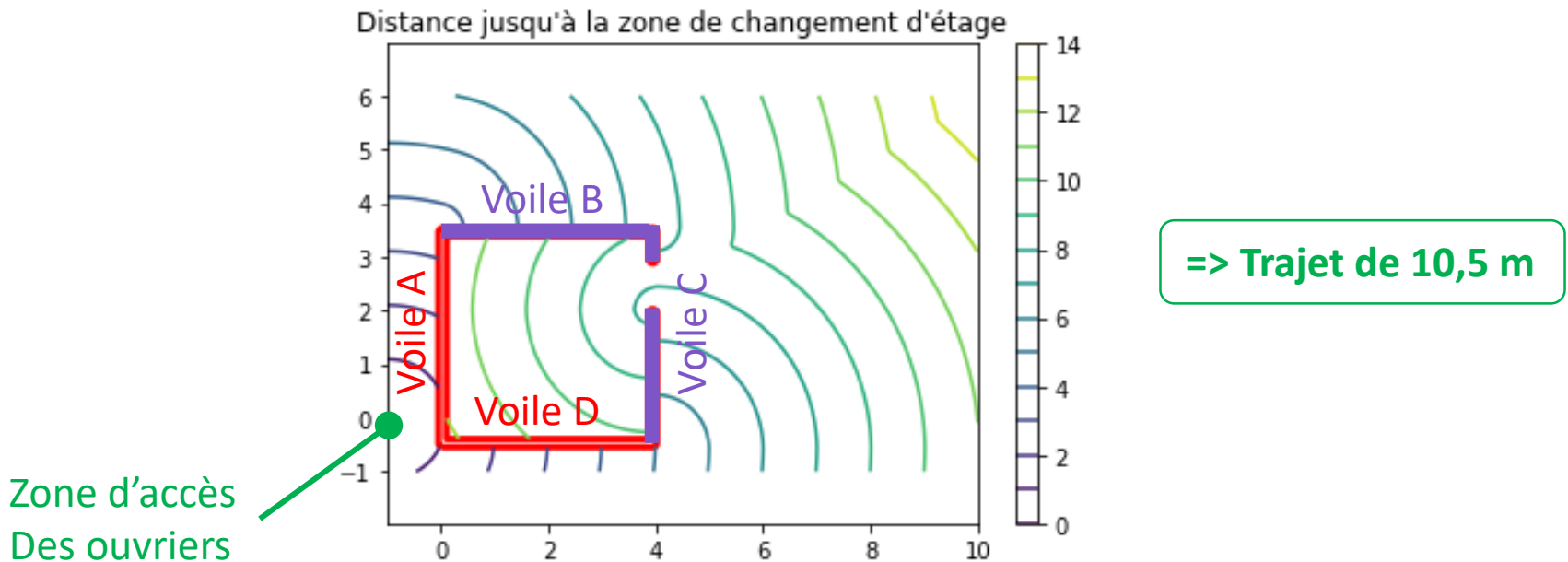
Algorithmes pour définir un trajet optimum :

- Dijkstra [Dijkstra 1959]
 - Parcours tous les chemins possibles à partir d'un point de départ
- A* [Hart, Nilsson, Raphael 1968]
 - Plus efficace que Dijkstra dans des domaines avec des obstacles posés aléatoirement mais pas pour notre application avec des pièces fermées!
- **FastMarching [Sethian 1996]**
 - Même idée que Dijkstra mais avec une résolution de l'équation eikonale (résolution de problème de propagation d'ondes)
 - Permet de faire des zones de départ et non pas seulement un point de départ
 - Meilleure approximation des distances réelles (pas besoin d'artefact pour les diagonales)

Critères d'évaluation d'une solution – Cas du trajet des ouvriers

Exemple d'application

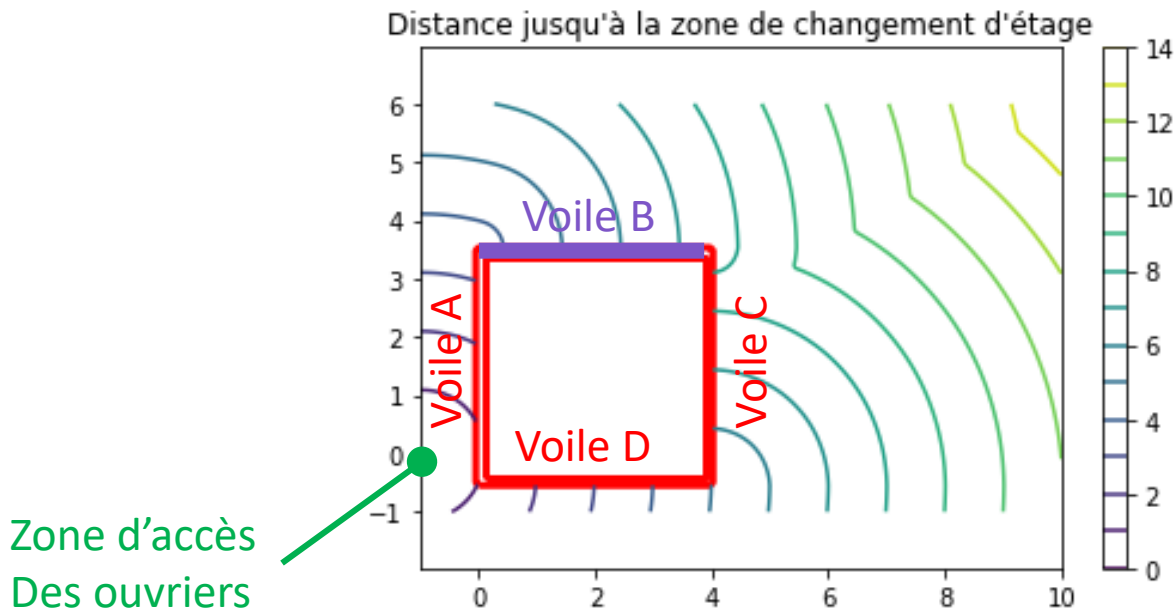
- Cas 1 : Réalisation des voiles A et D (B et C déjà coulés)



Critères d'évaluation d'une solution – Cas du trajet des ouvriers

Exemple d'application

- Cas 2 : Réalisation des voiles A, C et D (B déjà coulé)

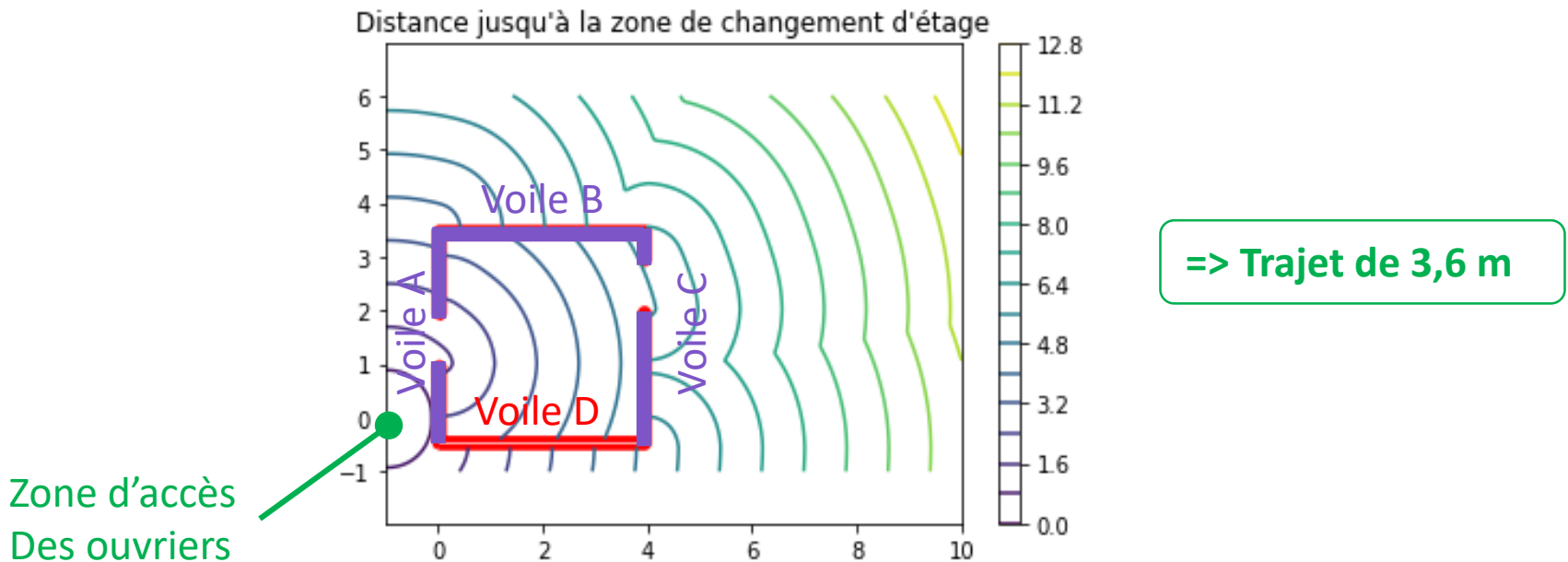


=> Pas de trajet possible
<=> Temps infini !

Critères d'évaluation d'une solution – Cas du trajet des ouvriers

Exemple d'application

- Cas 3 : Réalisation du voile D (A, B et C déjà coulés)



Optimiser le cyclage d'un ouvrage en béton armé

2^e partie

Mettre en place une méthodologie pour :

- Définir des solutions
- Faire évoluer ces solutions
- Choisir la meilleure

1^{re} partie

Nécessite une **évaluation** des solutions
via des **critères**

$$M_s = \frac{\gamma_1 C_{liss_mur} + \gamma_2 C_{liss_dalle} + \gamma_3 C_{liss_mannequin} + \gamma_4 C_{stab} + \gamma_5 C_{dist}}{\sum_{i=1}^n \gamma_i}$$

Optimisation par algorithme génétique

Définition d'un individu

Vecteur contenant les phases des X dalles et Y murs qui composent un étage de bâtiment répétitif :

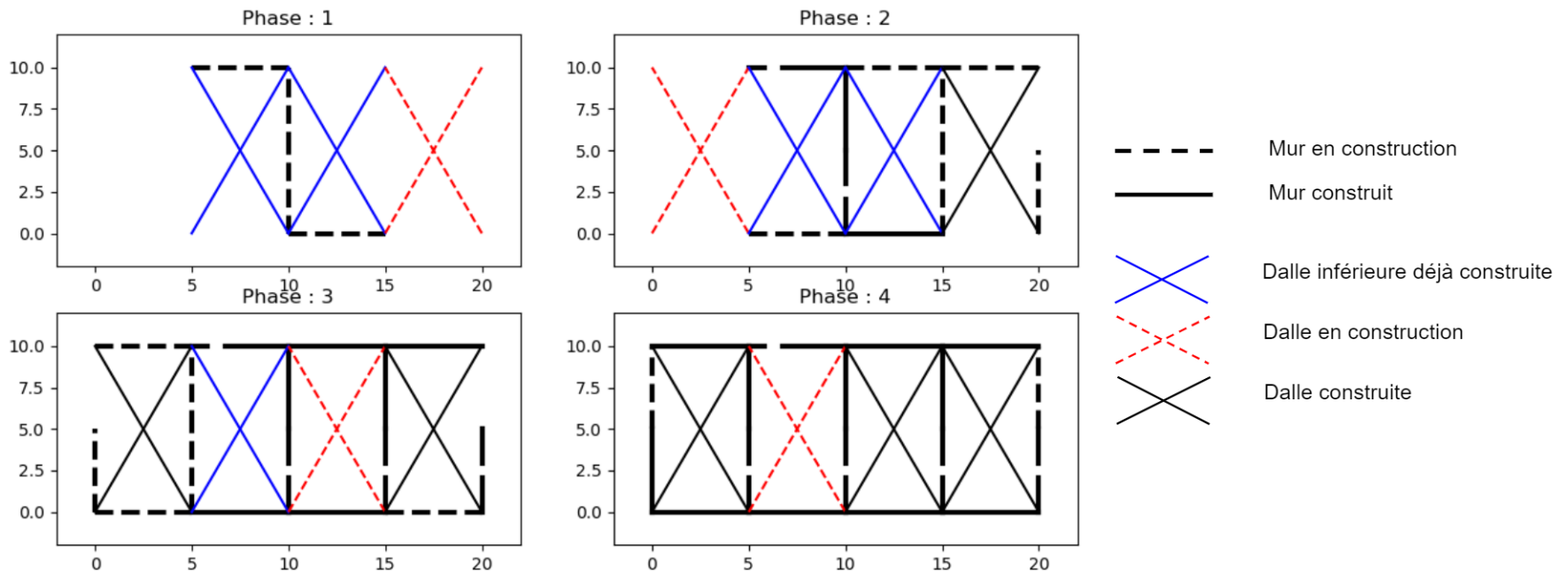
$[Phase_{D1}, \dots, Phase_{DX}, Phase_{M1}, \dots, Phase_{MY}]$

Optimisation par algorithme génétique

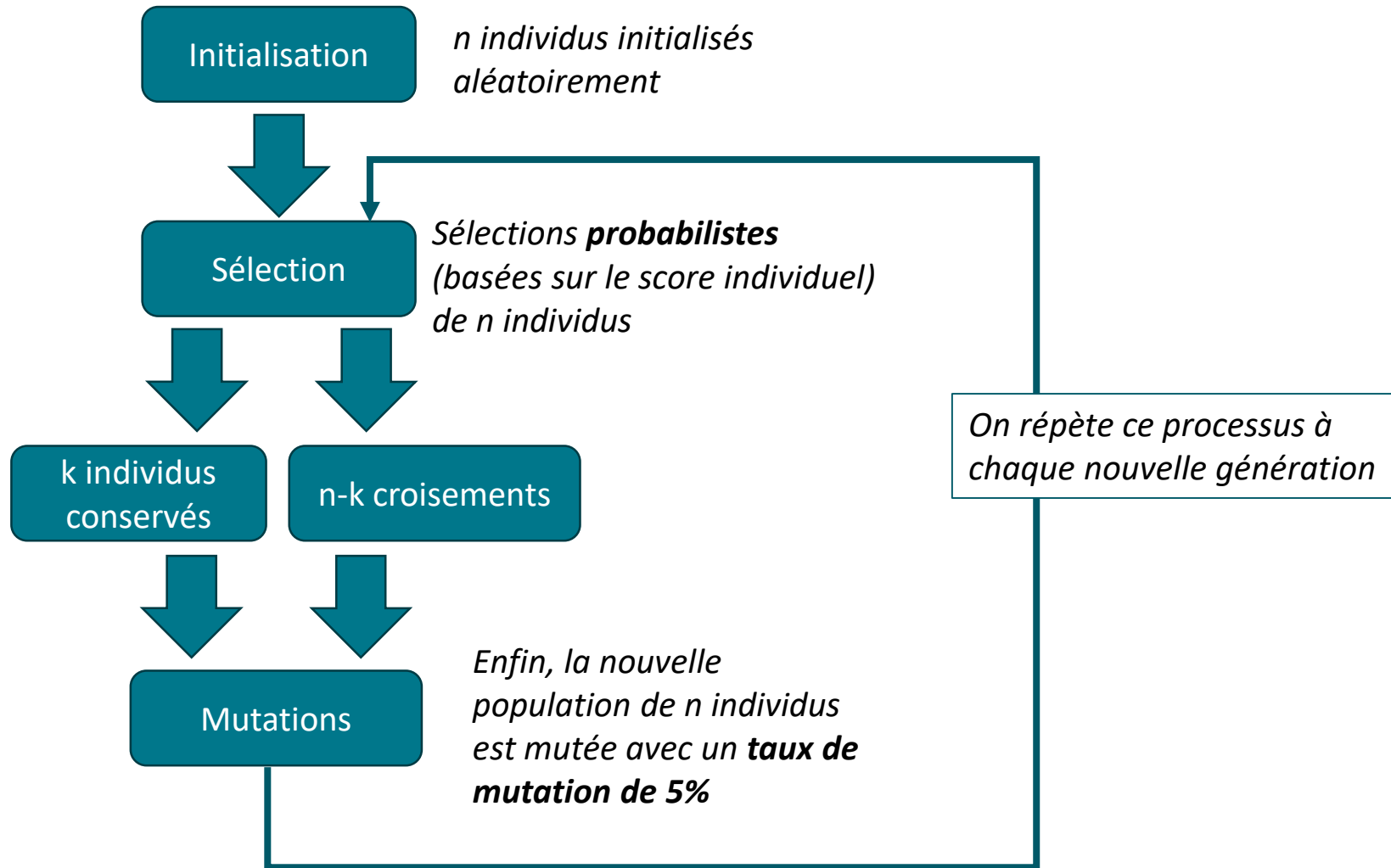
Définition d'un individu

- Exemple sur un bâtiment avec 4 éléments dalles et 18 éléments murs
[Phase_{D1}, Phase_{D2}, Phase_{D3}, Phase_{D4}, Phase_{M1}, Phase_{M2}, ..., Phase_{M17}, Phase_{M18}]

Exemple d'individu : [2, 1, 4, 3, 3, 4, 3, 2, 1, 3, 3, 4, 4, 4, 2, 2, 3, 2, 2, 1, 1, 2]

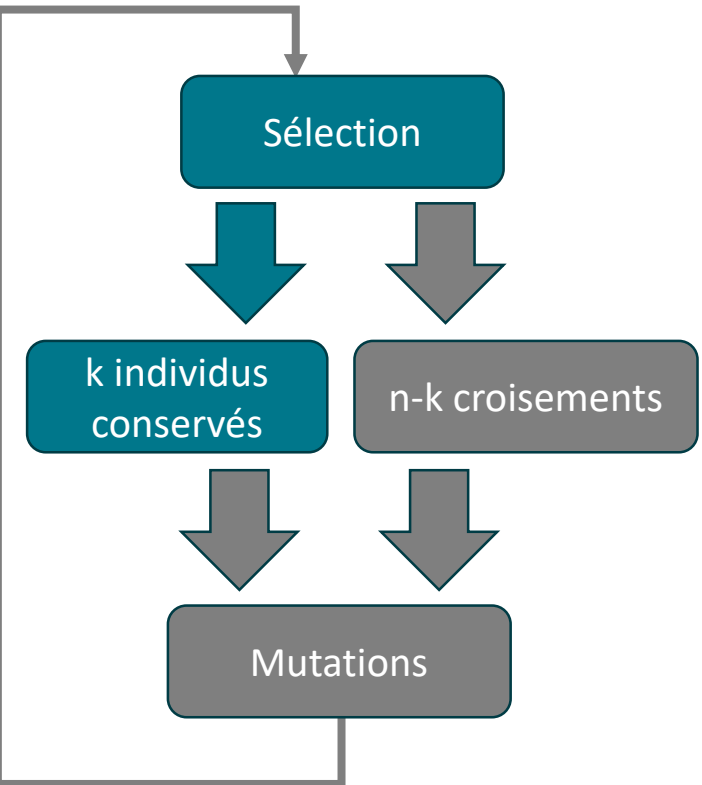


Optimisation par algorithme génétique



Optimisation par algorithme génétique – opération sur les individus

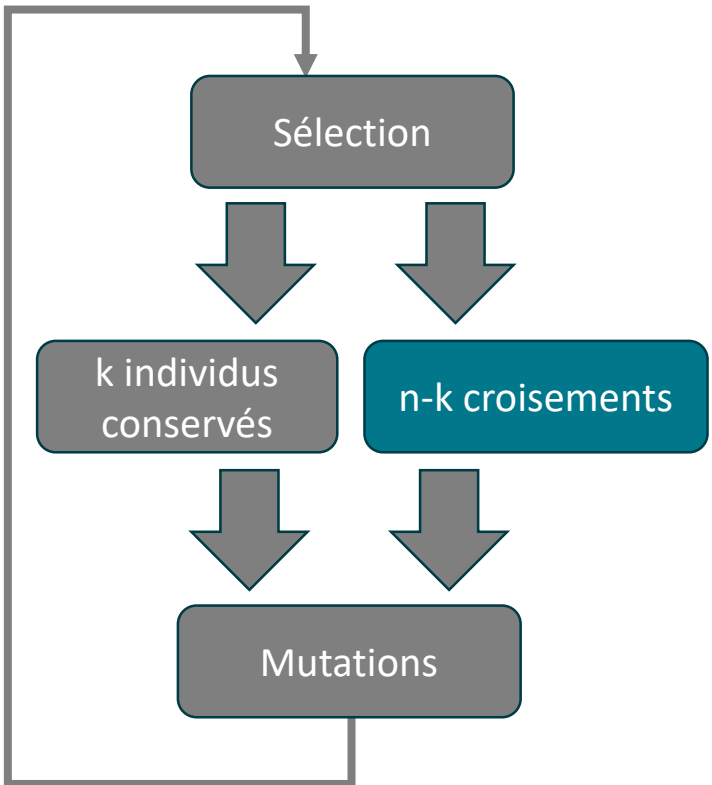
Sélection



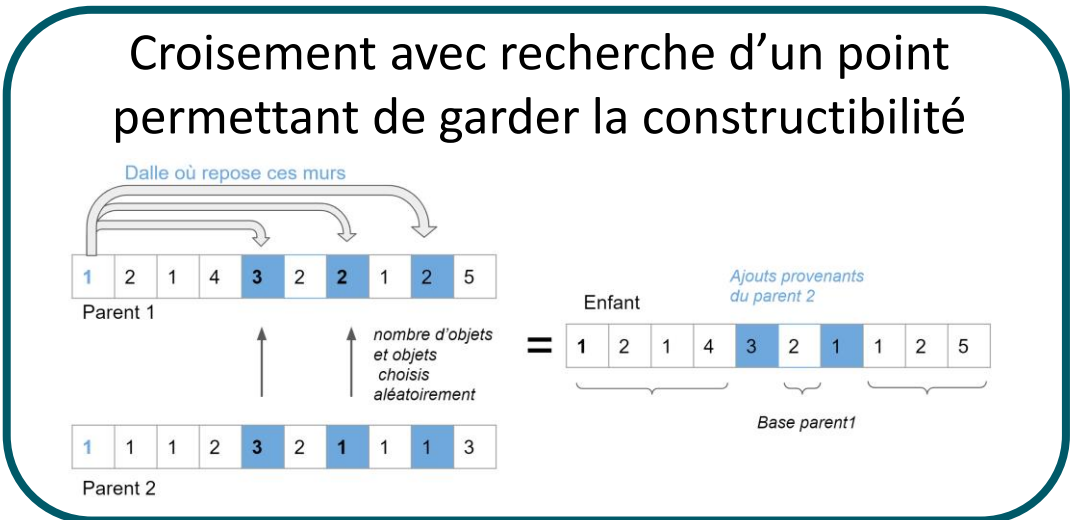
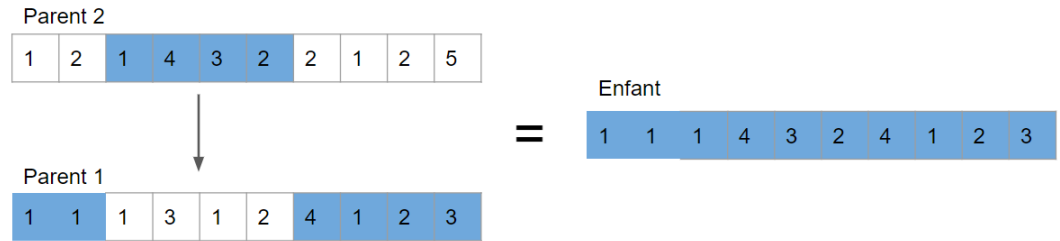
1. Attribution d'une probabilité de sélection d'un individu en fonction de son score
2. Les k meilleurs individus sont conservés, les meilleurs suivants servent de parents

Optimisation par algorithme génétique – opération sur les individus

Croisement

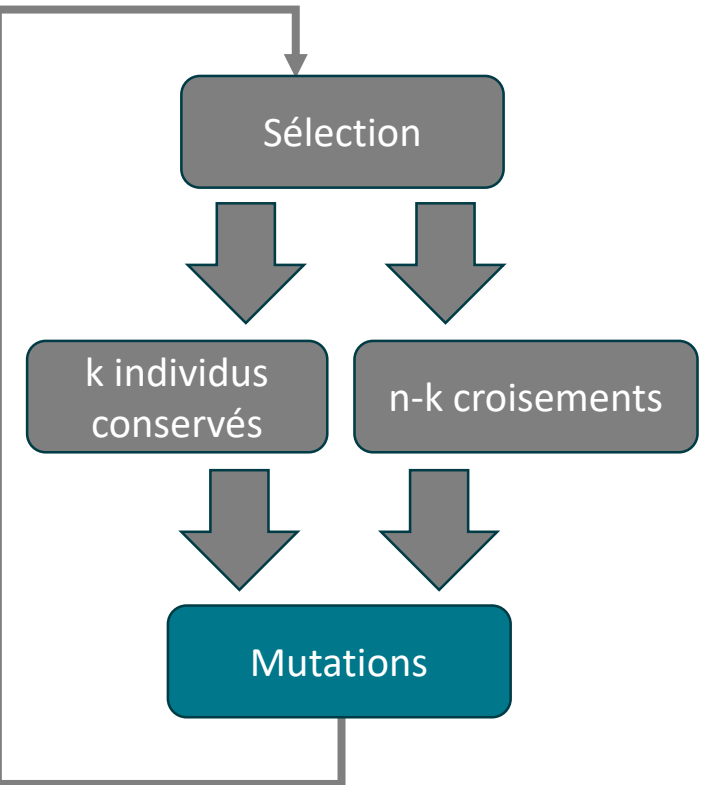


Croisement « standard »



Optimisation par algorithme génétique – opération sur les individus

Mutation



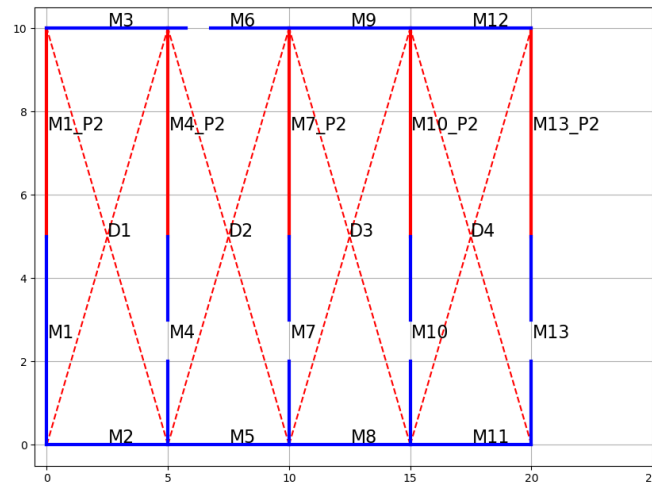
Mutation sur un pourcentage de la population (5% dans cette étude)



Résultats – Cas d'un exemple académique

Description du problème

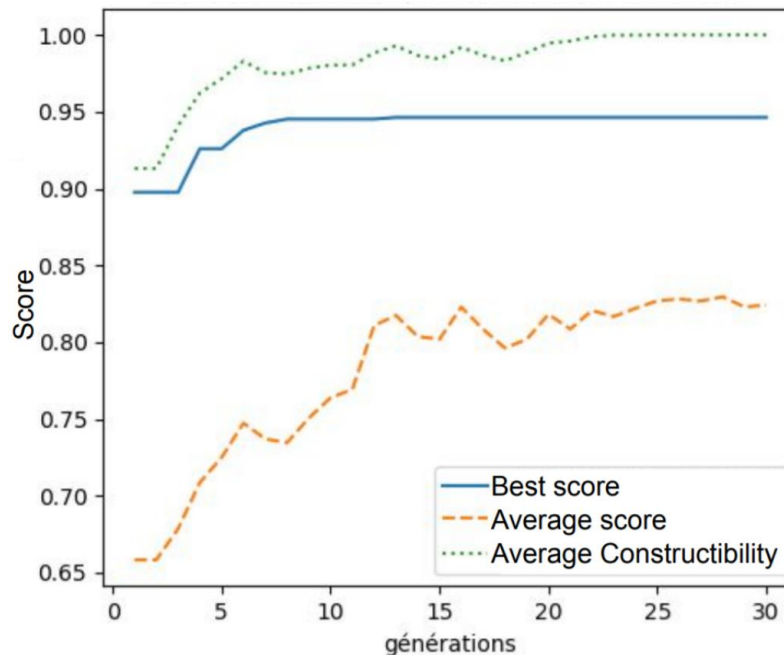
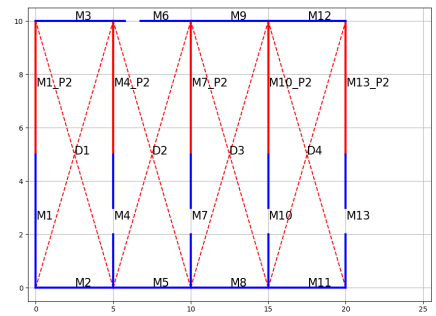
- 22 éléments (4 dalles et 18 éléments murs)
 - 4 phases
- => 4^{22} possibilités ~ $1,8 \cdot 10^{13}$ possibilités !



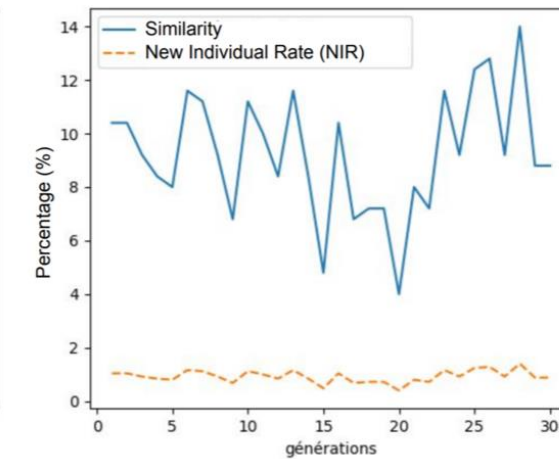
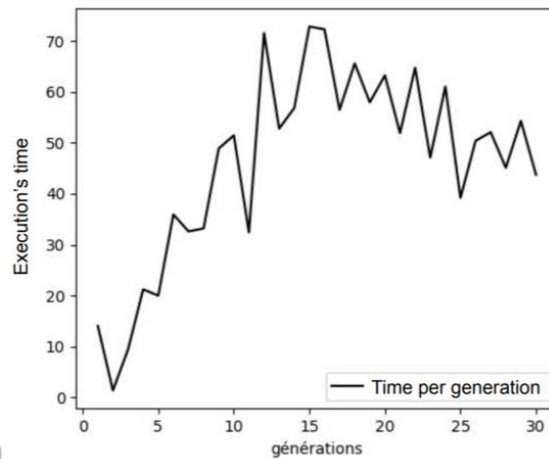
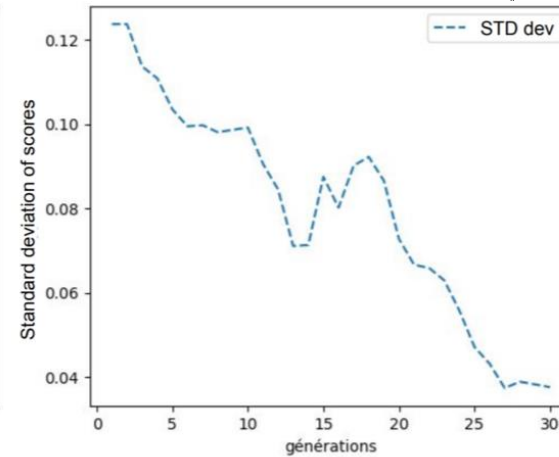
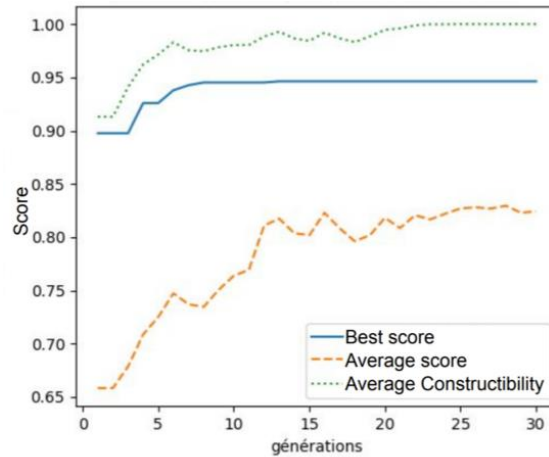
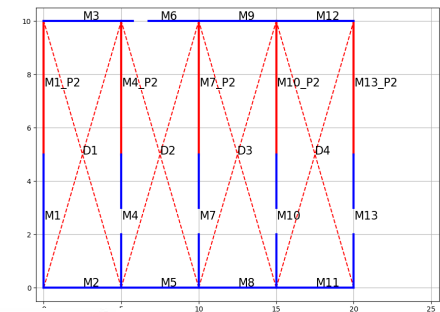
Résultats – Cas d'un exemple académique

Paramètre de l'algorithme génétique

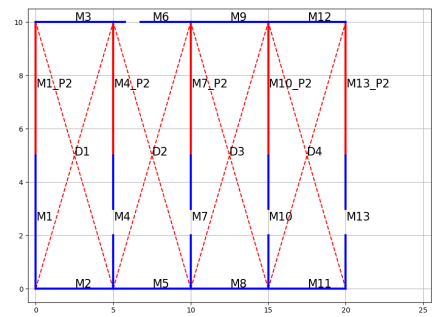
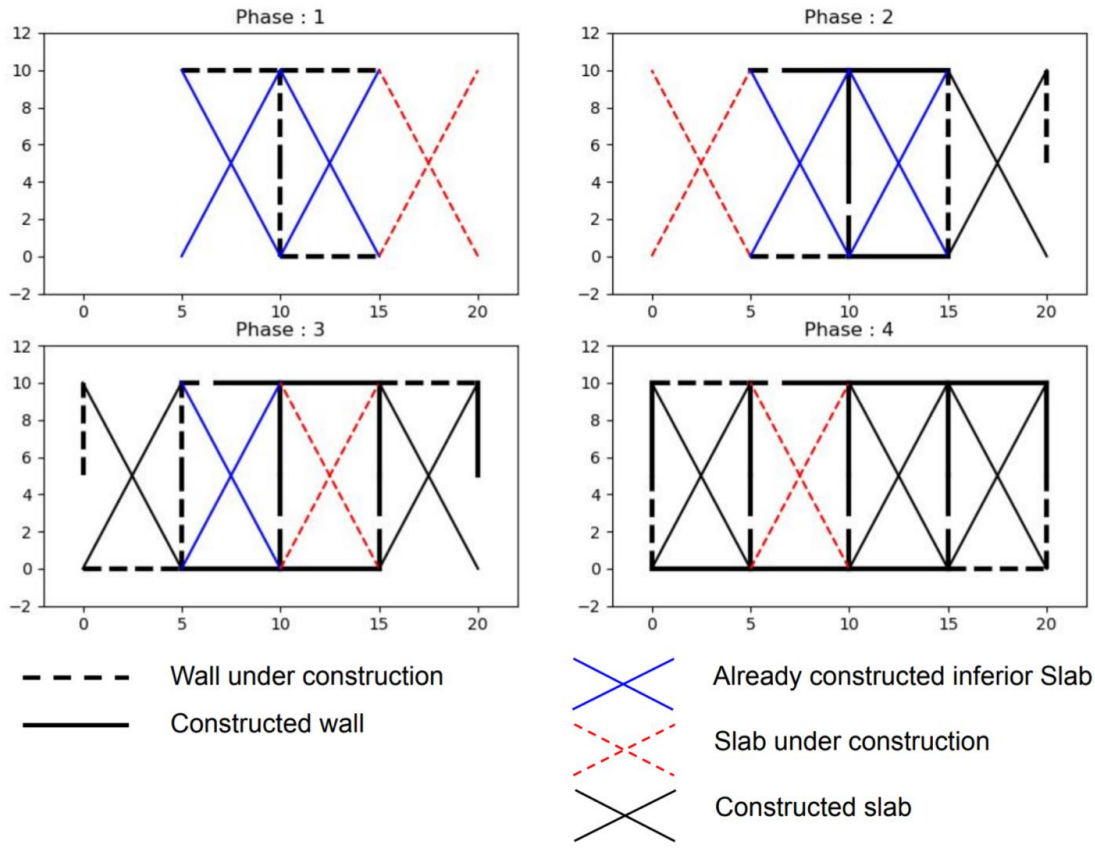
- 250 individus
- 30 générations
- Taux de mutation de 5%
- Taux de conservation des élites : 5%



Résultats – Cas d'un exemple académique



Résultats – Cas d'un exemple académique

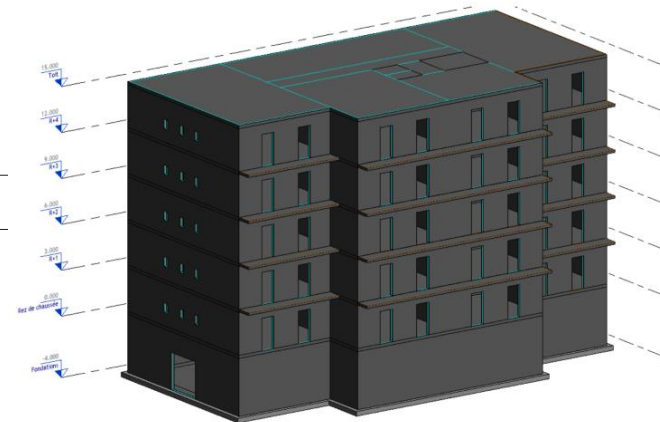
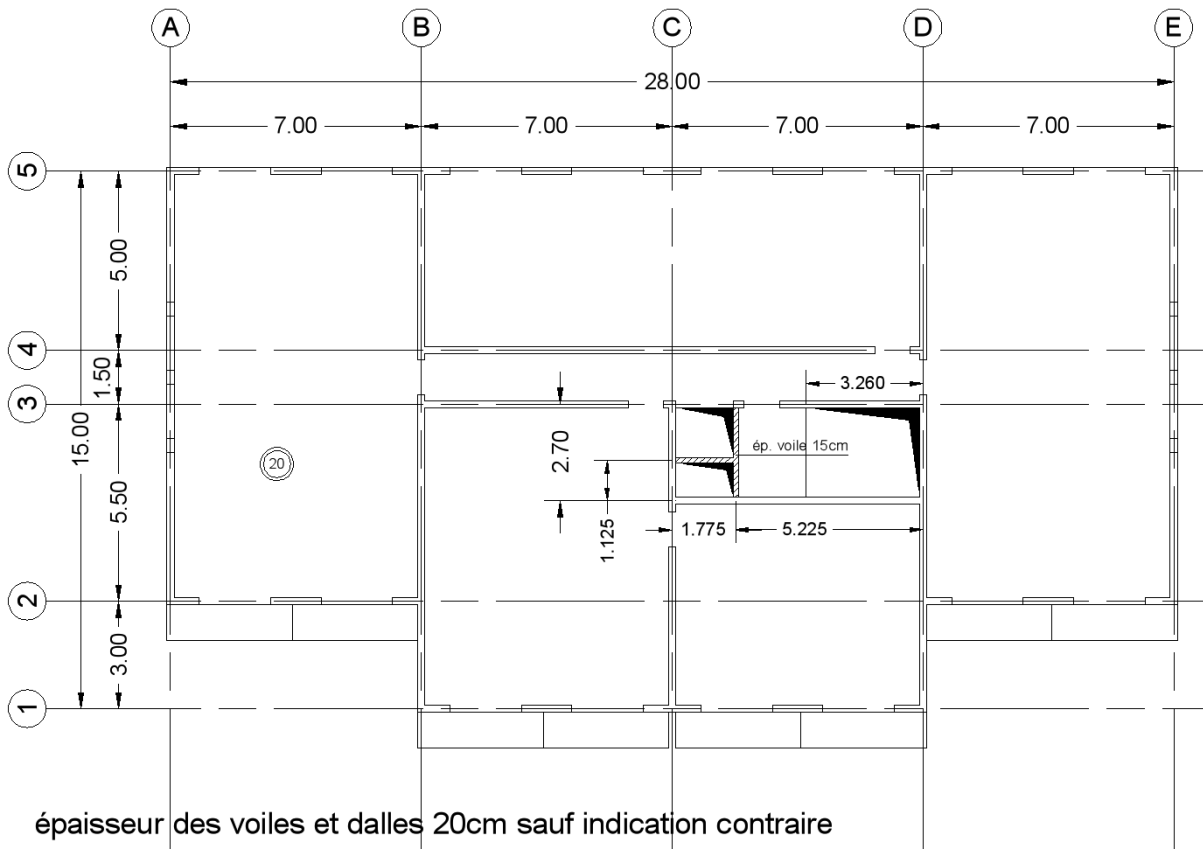


	phase 1	phase 2	phase 3	phase 4
Moulds (door)	2	1	1	1
Wall length (m)	25	20	25	20
Slab surface (m ²)	50	50	50	50
$\sum accessibility_{pe,i}$ (m)	131	101	116	143

Criterion	C_{walls}	C_{slabs}	C_{moulds}	$C_{constructibility}$	$C_{accessibility}$
score	0.89	1.0	0.65	1.0	0.87

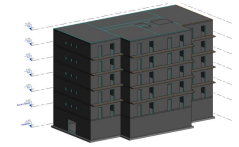
Résultats – Cas d'un exemple de bâtiment standard

Description du problème : 12 dalles, 24 murs, 6 phases



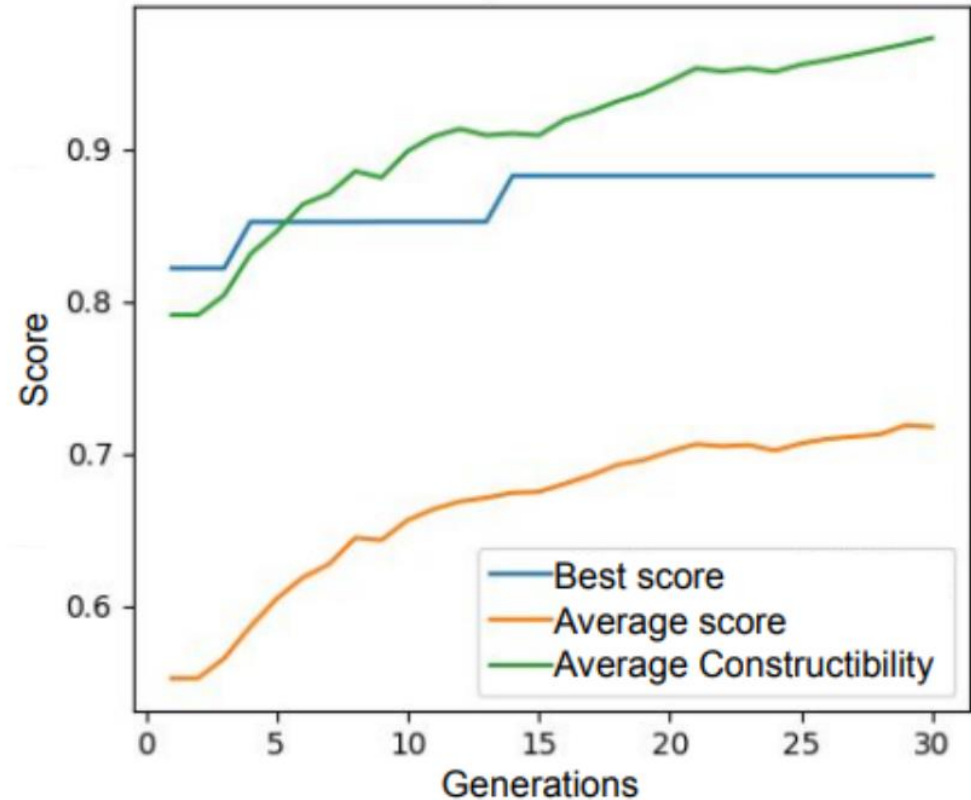
épaisseur des voiles et dalles 20cm sauf indication contraire

Résultats – Cas d'un exemple de bâtiment standard

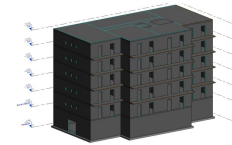


Paramètre de l'algorithme génétique

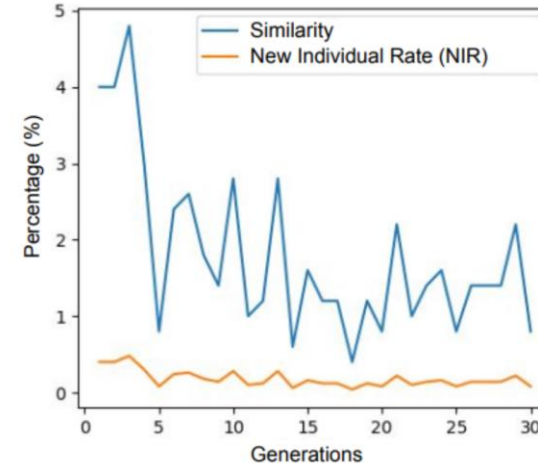
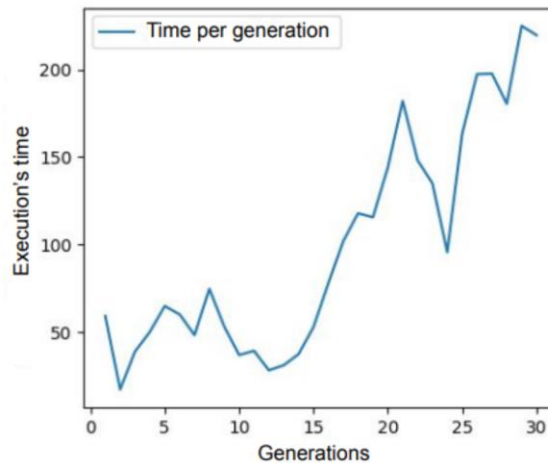
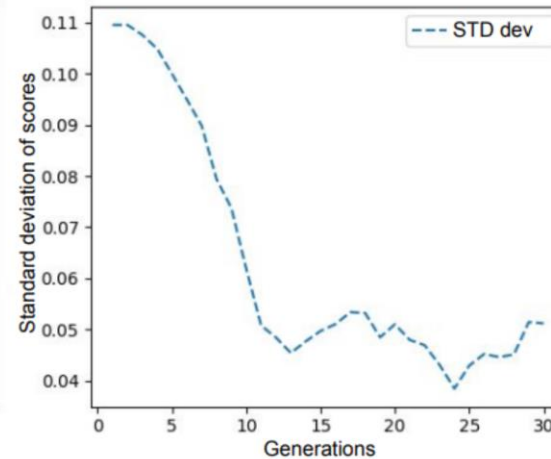
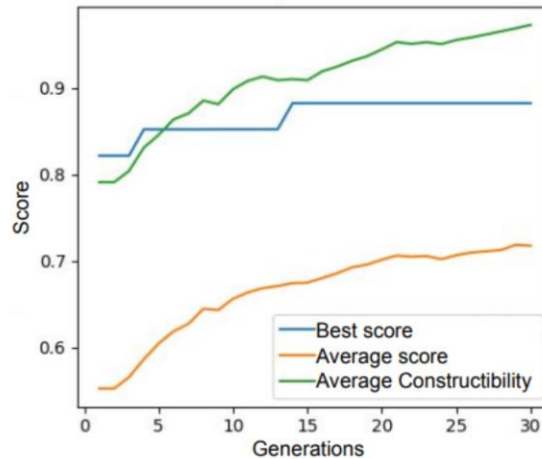
- 500 individus
- 30 générations
- Taux de mutation de 5%
- Taux de conservation des élites : 5%
- *Taux de nouveaux individus : 10%*



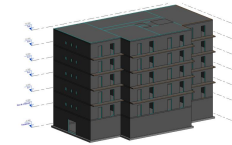
Résultats – Cas d'un exemple de bâtiment standard



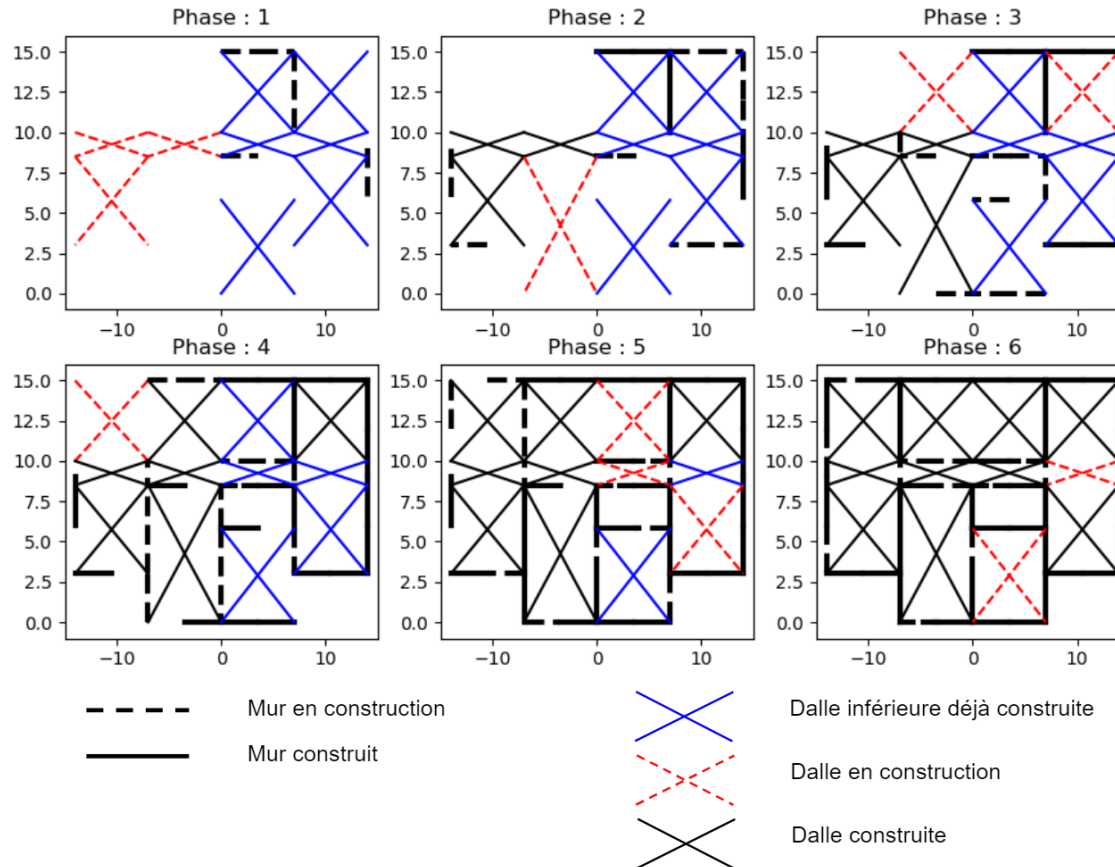
Description du problème : 12 dalles, 24 murs, 6 phases



Résultats – Cas d'un exemple de bâtiment standard



Description du problème : 12 dalles, 24 murs, 6 phases



Conclusions

Preuve de concept sur un étage standard de bâtiment répétitif

- L'application d'un **algorithme de *fast marching*** [Sethian, 1996] permet de calculer phase par phase les **distances minimales des trajets des ouvriers** pour chacun des murs à réaliser
- **Le champ des solutions des cyclages est très grand !**
 - l'ordre de grandeur est de 10^{13} pour un bâtiment que l'on nommera « académique » avec seulement 4 salles
 - parcourir cet espace par des tirages aléatoires pour trouver une séquence réaliste nécessiterait 8.10^9 s, soit 254 ans sur un ordinateur standard de 2020
- Un **algorithme génétique simple** permet d'avoir des **solutions constructibles** en seulement 30 générations (*45 minutes pour l'application présentée - processeur 2,8 GHz, 16 Go de RAM*)

Perspectives

Champs d'application

- Valider sur des bâtiments avec d'autres types de structures (poteaux/poutres, ...)
- Étendre le problème à un chantier tout corps d'états et non plus simplement gros œuvre/superstructure

Pertinence des solutions

- Effectuer une étude plus poussée sur les paramètres de l'algorithme (nombre d'individus, taux de mutation, taux d'individus conservés, ...)
- Ajouter un critère sur la variabilité des solutions \Leftrightarrow quel impact si il y a du retard sur la réalisation d'un mur ou d'une dalle ?

Bibliographie

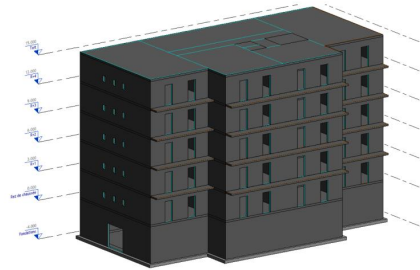
Optimisation numériques du cyclage

- Kenneth F. Reinschmidt, Julian H. Kang, Vahid Faghihi, Ali Nejat. Automation in construction scheduling : a review of the literature. Int J Adv Manuf Technol, 81 :1845–1856 (2015)
- Vahid Faghihi, Kenneth F. Reinschmidt, Julian H. Kang. Construction scheduling using Genetic Algorithm based on Building Information Model. Expert Systems with Applications 41 : 7565-7578 (2014)

Trajet optimal

- A.R. Soltani, H. Tawfik, J.Y. Goulermas, T. Fernando. “Path planning in construction sites ; performance evaluation of the Dijkstra, Ap, and GA search algorithms”. In : (2003)
- Sethian J.A. A fast marching level set method for monotonically advancing front. Proc.Natl. Acad. Sci., 93 :1591–1595, (1996)
- Dijkstra, E. W. “A Note on Two Problems in Connexion with Graphs”. In : (1959)

Avez-vous des questions ?



Optimisation du cyclage d'un ouvrage en béton armé via un algorithme génétique

Arthur Calvi¹, Xavier Jourdain¹, Farid Benboudjema¹

¹ Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CNRS

LMT – Laboratoire de Mécanique et Technologie

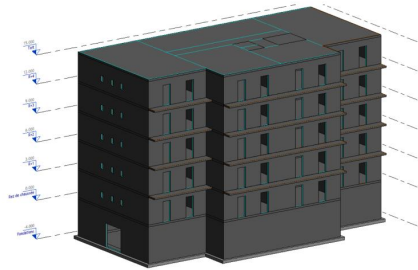
Contact : xavier.jourdain@ens-paris-saclay.fr



Workshop – 14/10/2020

école _____
normale _____
supérieure _____
paris–saclay _____

Bon appétit !



Optimisation du cyclage d'un ouvrage en béton armé via un algorithme génétique

Arthur Calvi¹, Xavier Jourdain¹, Farid Benboudjema¹

¹ Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CNRS

LMT – Laboratoire de Mécanique et Technologie

Contact : xavier.jourdain@ens-paris-saclay.fr



Workshop – 14/10/2020