

OPTIMISATION DE L'ENGAGEMENT DES OPÉRATEURS DANS UN ATELIER DE PEINTURE D'UNE CHAÎNE DE MONTAGE AUTOMOBILE

JEAN-BAPTISTE PONS & ALAIN NGUYEN
PÔLE RECHERCHE OPÉRATIONNELLE

CONGRÈS ROADEF – COMPIÈGNE – 10 FÉVRIER 2016



DIRECTION
REDACTOR

DATE

CONFIDENTIAL
PROPERTY OF GROUPE RENAULT

GROUPE RENAULT

SOMMAIRE

01

Problématique métier

02

Modèle d'optimisation

03

Conclusions et perspectives



01

PROBLÉMATIQUE MÉTIER

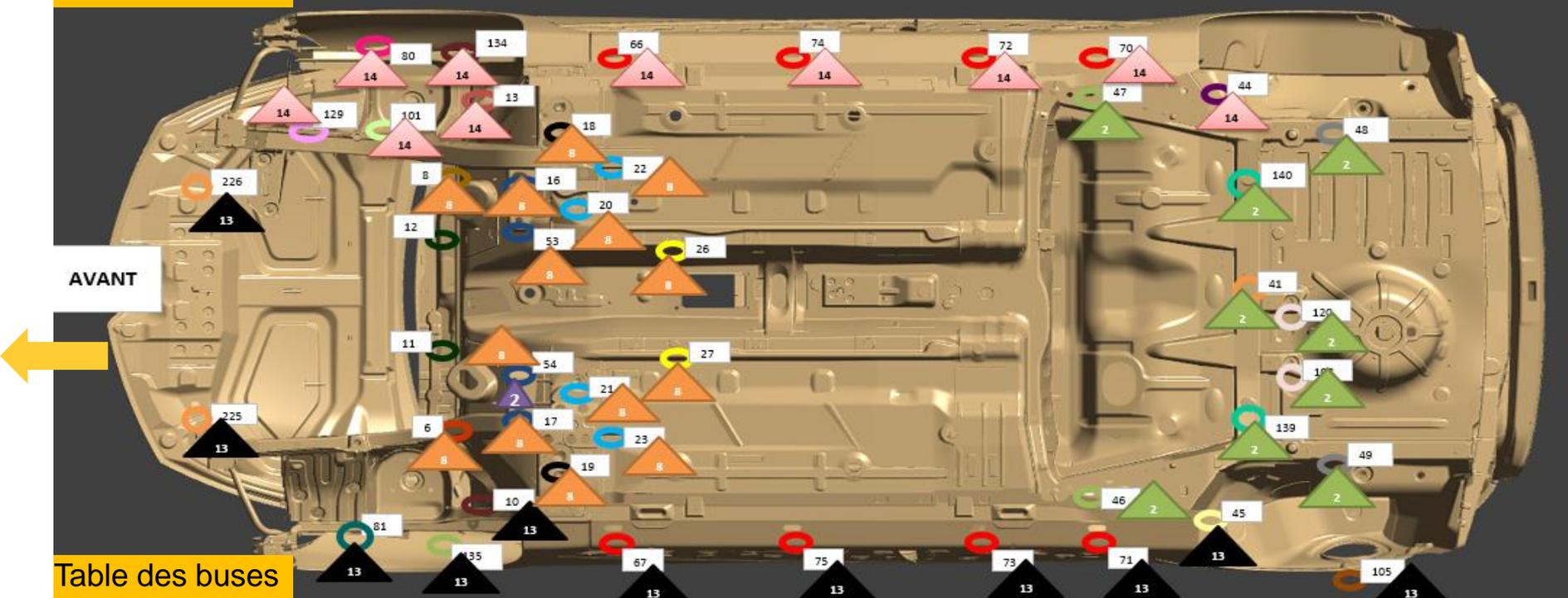


Atelier de cire sur la chaîne de peinture

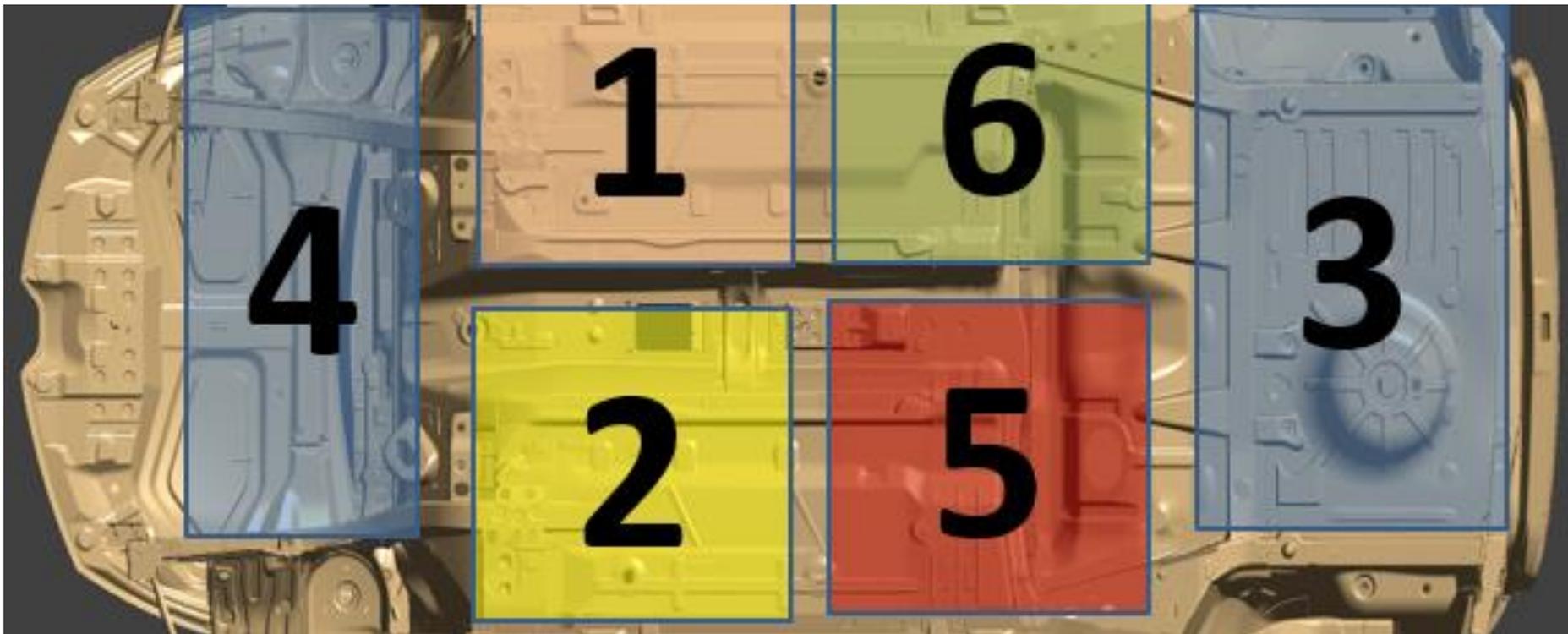


Trous à remplir sous la caisse

Table des buses



Division de la sous-caisse en blocs



Modélisation des temps de déplacement inter-blocs + interdictions sur des transitions inter-blocs



EXEMPLE D'ENGAGEMENT AVEC 4 OPÉRATEURS

Table des buses

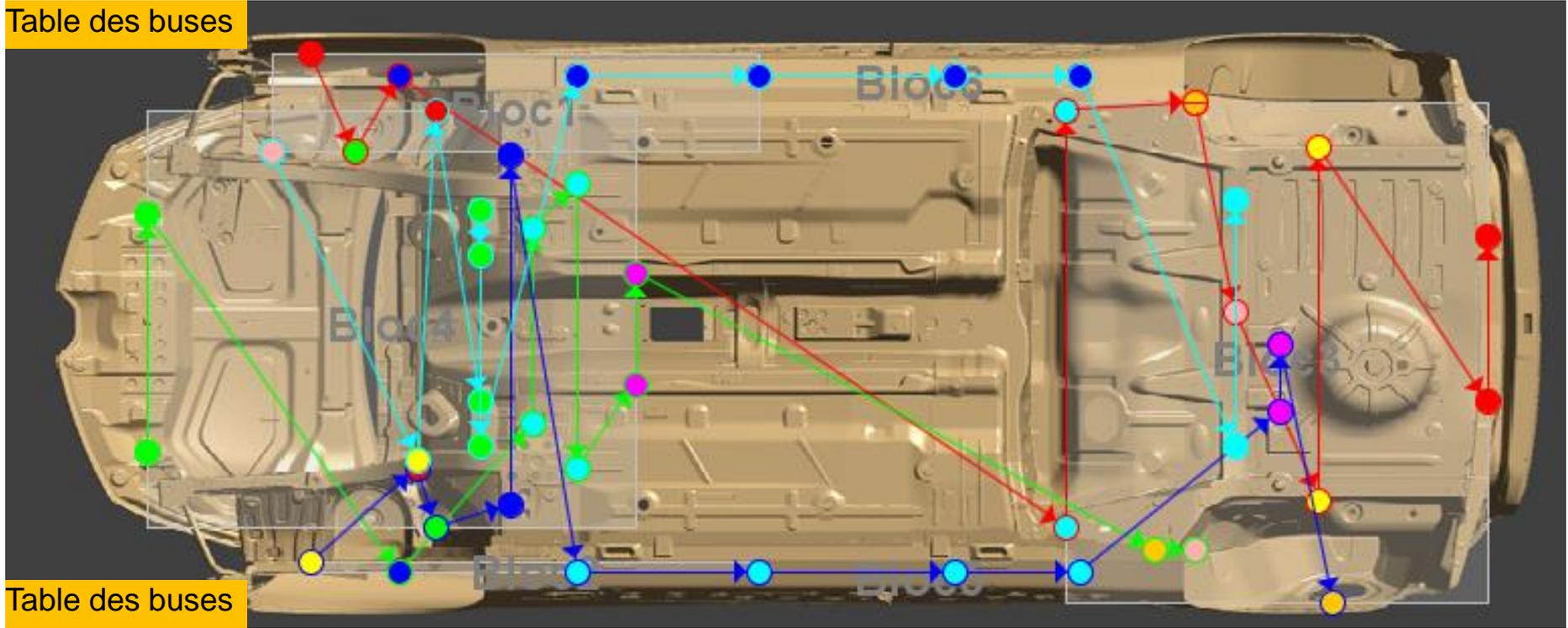


Table des buses

Colorisation des trous selon les buses utilisées



1^{ER} OPERATEUR

Table des buses

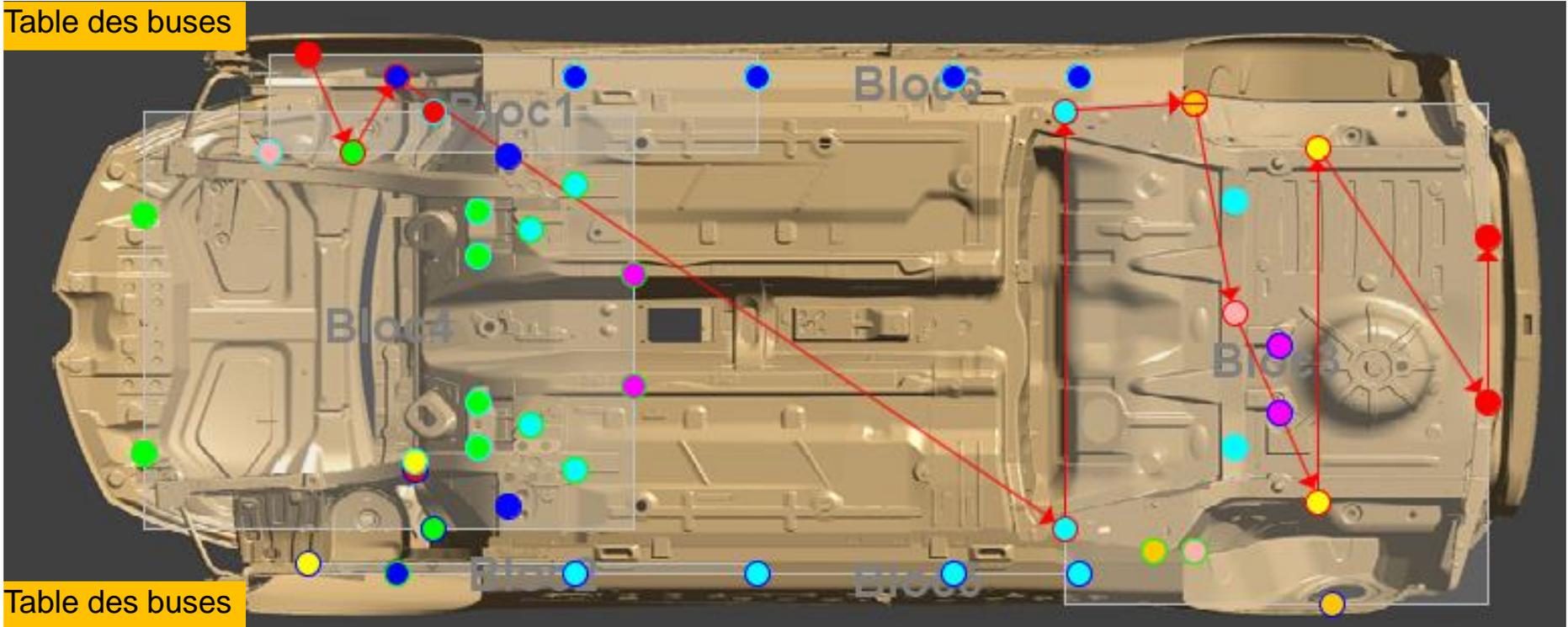


Table des buses



DIRECTION
REDACTOR

DATE

CONFIDENTIAL
PROPERTY OF GROUPE RENAULT

| 8

2^E OPERATEUR

Table des buses

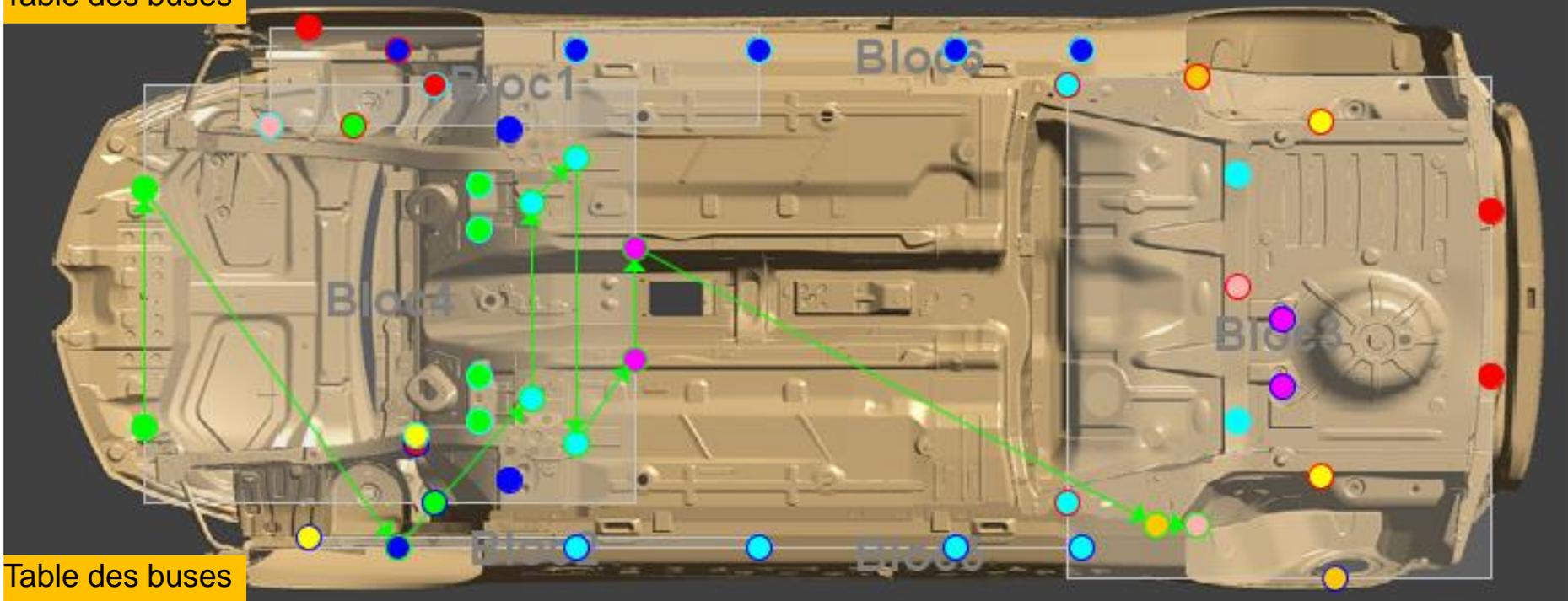


Table des buses



Temps de cycle d'un opérateur =
temps d'opération sur les trous
+ temps de déplacement entre les trous
+ temps changement de buse (avec aller-retour vers la table des buses)

Le schéma est simplificateur sur les déplacements réels des opérateurs



Déplacements réels dûs au changement de buse ... la caisse avance, mais pas les tables des buses !

02

MODELE D'OPTIMISATION



Objectifs

1. Minimiser le nombre d'opérateurs
2. Lisser les taux d'engagement des opérateurs
Taux d'engagement de l'opérateur : $\left(\frac{\text{temps de cycle opérateur}}{\text{temps de cycle max}}\right) < 100\%$
3. Minimiser les temps de déplacement (non productifs)

Contraintes

- Temps de cycle d'un opérateur \leq temps de cycle de la caisse
- Chaque trou n'est traité qu'une et une seule fois
- Il y a un unique exemplaire de chaque type de buse \Rightarrow tous les trous servis par la même buse doivent être affectés au même opérateur
- Interdictions de déplacements entre certains blocs, pour des questions de sécurité

Génération de colonnes simplifiée

Colonne

- Liste ordonnée de trous affectés à un opérateur
- Chemin de l'opérateur pour couvrir les trous qui lui sont affectés
ex: (**trou4** ▶ **trou18** ▶ **trou9** ▶ ...)

Coût d'une colonne

= coût du plus court chemin pour parcourir tous les trous de la colonne

= temps de cycle de l'opérateur



Calcul plus court chemin

Table des buses fixe mais caisse en mouvement

⇒ lorsqu'il y a passage par la table des buses pour changer d'outillage entre 2 trous :

- $\text{temps_depl}(\text{trou}_i, \text{trou}_j) = \text{temps_depl}(\text{trou}_i, \text{table}) + \text{temps_depl}(\text{table}, \text{trou}_j)$
- recalculer la position du trou_i au temps T_i quand l'opérateur arrive à ce trou, et recalculer la position du trou_j au temps T_j quand l'opérateur repart de la table

⇒ impossible de calculer a priori la matrice des temps de déplacement entre trous

⇒ motivation pour utiliser une méta-heuristique, plutôt que les algorithmes classiques de PCC : prise en compte plus aisée de cette modélisation des temps de déplacement

Calcul du PCC par un algorithme génétique

Soit une colonne de p points

$t(1)$	$t(2)$...	$t(p)$
--------	--------	-----	--------

- 1) Générer population initiale de N chemins générés aléatoirement ; calculer et conserver les longueurs de ces chemins ;
- 2) Ranger la liste des chemins dans l'ordre croissant de leurs coûts ;
- 3) Retenir les $N/2$ plus courts chemins, effectuer un « cross-over » entre mères (1^{er} au $N/4^{\text{e}}$ chemin) et pères ($N/4+1^{\text{e}}$ au $N/2^{\text{e}}$ chemin) :

Mère

Père

$s(1)$	$s(2)$...	$s(k-1)$
--------	--------	-----	----------

$s(k)$...	$s(p)$
--------	-----	--------

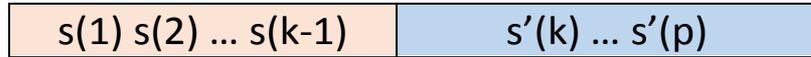
$s'(1)$	$s'(2)$...	$s'(k-1)$
---------	---------	-----	-----------

$s'(k)$...	$s'(p)$
---------	-----	---------

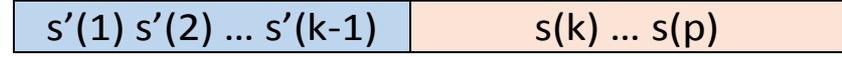
(L'indice k de partitionnement des chemins est déterminé aléatoirement lors de l'opération de cross-over)

On génère deux enfants On applique sur ces deux enfants une mutation en inter-changeant les sommets des indices α_1 et α_2 (tirés eux aussi aléatoirement).

Kid 1



Kid 2



4) Remplacer les $N/2$ plus longs chemin de la liste par les enfants fraîchement générés ;

5) Si le chemin le plus court courant s'est amélioré « récemment » ($< \mu$ derniers tours, μ à fixer), on revient en 2.

Sinon, on sort et on retourne le plus court chemin de la liste.



Énumération exhaustive des colonnes

... rendue possible par les contraintes métier 😊

Chaque buse ne peut être affectée qu'à un seul opérateur

⇒ tous les trous servis par la même buse doivent être affectés au même opérateur

⇒ combinatoire sur les buses et non plus sur les trous (29 buses vs 50 trous)

Paramètres métier pour piloter la qualité de la solution :

Pour limiter les temps de déplacement :

nombre maximal de buses par opérateur

nombre maximal de trous qu'un opérateur doit traiter

Pour lisser la charge entre les opérateurs :

temps de cycle minimal d'un opérateur (calculé automatiquement par l'outil)

Procédure d'énumération des colonnes

- **Pré-calcul de plus courts chemins**

Pour chaque groupe de trous de même buse : calcul du coût du plus court chemin entre ces trous

L'ordre de parcours de ces trous ne dépend pas des trous précédents, ni des trous suivants => on doit parcourir tous les trous d'une buse avant de passer aux trous d'une autre buse

- **Enumérer les combinaisons de groupes de trous via un parcours arborescent en profondeur d'abord**

- **Condition d'arrêt de recherche dans une branche:**

- un coût supérieur au temps de cycle maximal
- limiter la recherche aux combinaisons de buses dont les points sont compatibles

-

- **Satisfaction des paramètres métier**

- le nombre maximal de buses par opérateur
- le nombre maximal de trous qu'un opérateur doit traiter
- temps de cycle minimal pour un opérateur

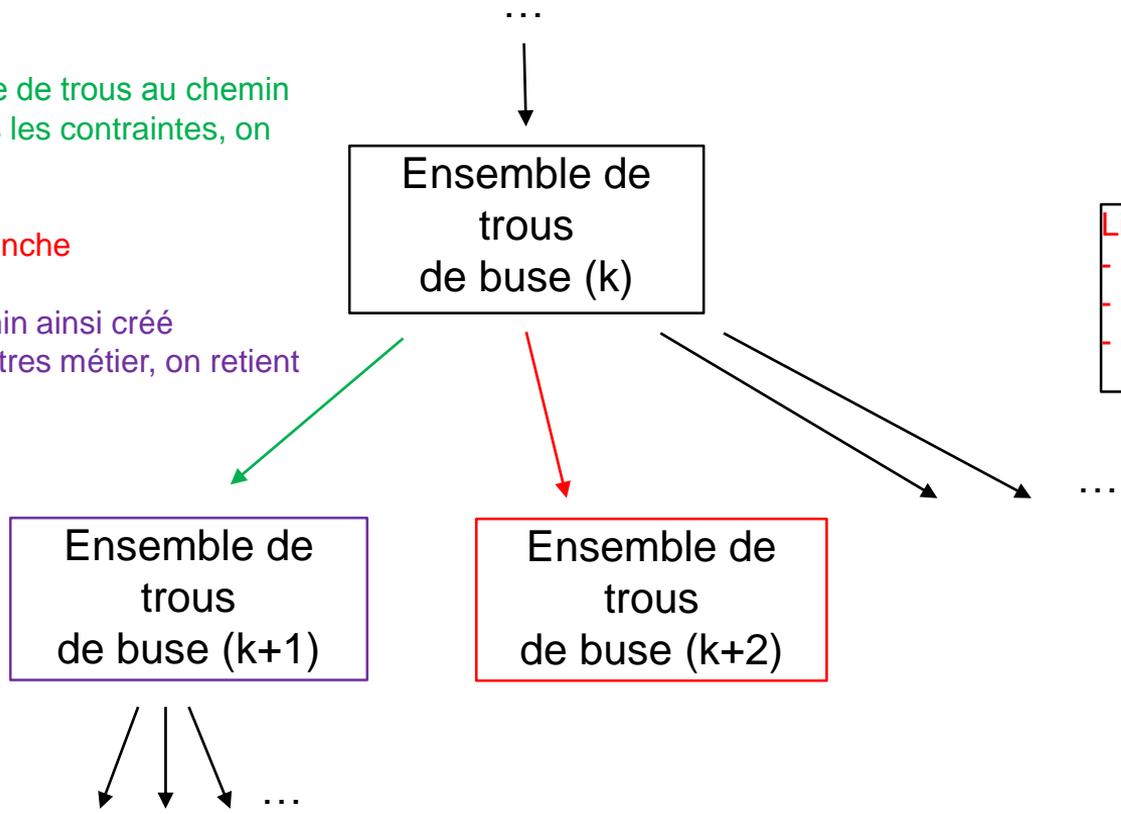


Parcours arborescent pour énumérer les colonnes

Si l'ajout de l'ensemble de trous au chemin courant satisfait toutes les contraintes, on rentre dans ce nœud

Sinon, on coupe la branche

Si les valeurs du chemin ainsi créé respectent les paramètres métier, on retient ce nœud.



Limite sur:
- nombre max de buses
- nombre max de trous
- coût min d'une colonne



Programme maître de sélection des colonnes

x_p : variable booléenne de sélection de la colonne p

C_p : coût de la colonne p

$$\min \sum_{p \in P} c_p x_p, x_p = 1 \text{ si la colonne } p \text{ est sélectionnée, } 0 \text{ sinon}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Tous les points doivent être traversés une fois :} \\ \sum_{p \in P} a_{ip} x_p = 1, \forall i \in N, \text{ avec } a_{ip} = 1 \text{ si } i \in p, 0 \text{ sinon} \\ \\ \text{Le nombre de } \mathbf{colonnes} \text{ sélectionnées} = \text{le nombre d'opérateurs :} \\ \sum_{p \in P} x_p = K \\ \\ x_p \in \{0,1\} \end{array} \right.$$

Génération de plusieurs solutions très diversifiées :

=> itérations sur le programme maître, avec ajout de coupes après chaque résolution, pour interdire la reproduction de certaines configurations

Demande forte du chef d'atelier

Exemples de résultats

Paramètres métier :

nombre max de buses d'un opérateur: 10

nombre max de trous d'un opérateur: 15

Temps min opérateur : 0 cmin (nombre colonnes générées: 618 650 en 2,7 sec)

6 OPÉRATEURS						
COÛT	28.33	64.55	80.94	54.05	45.50	11.05
NB POINTS	3	9	10	15	11	2
NB BUSES	3	5	7	7	5	2
NB BLOCS	1	6	8	11	8	1

Temps pour la résolution du MIP de sélection des colonnes : 13.73 sec



Itérations sur le temps min opérateur pour lisser

Temps min opérateur : 56 cmin

6 OPÉRATEURS						
COÛT	59.40	56.84	60.78	58.11	67.65	59.04
NB POINTS	8	10	6	8	8	10
NB BUSES	4	5	5	5	5	5
NB BLOCS	5	7	3	8	4	8

Temps pour la résolution PLNE de sélection des colonnes : 20.22 sec (CPLEX 12.4 sur PC core i7)



Temps min opérateur : 71 cmin (nombre colonnes générées: 536 420)

5 OPÉRATEURS					
COUT	77.82	74.41	74.47	75.23	71.61
NB POINTS	10	9	8	10	13
NB BUSES	6	6	6	6	5
NB BLOCS	6	7	6	6	8

Temps pour la résolution PLNE de sélection des colonnes : 26 SEC (CPLEX 12.4 sur PC core i7)

Temps min opérateur : 85.0 cmin (nombre colonnes générées: 360 819)

4 OPÉRATEURS				
COUT	86.98	87.76	86.70	85.70
NB POINTS	12	13	11	14
NB BUSES	8	6	8	7
NB BLOCS	8	8	7	12

Temps pour la résolution PLNE de sélection des colonnes : 21.65 sec

- L'atelier utilisait 6 opérateurs.
- Au vu des simulations, le chef d'atelier est passé à 5 opérateurs.
- La solution à 4 opérateurs était considérée comme trop risquée, car charge opérateurs jugée trop élevée

03

CONCLUSIONS & PERSPECTIVES



Utilisation effective de l'algorithme à l'usine de Bursa, en tant qu'outil d'aide à la décision pour le chef d'atelier (simulations en 2-3 min vs essais terrain en 1-2 semaines)

Etendre l'approche à l'atelier de joints mastic de la ligne de peinture mais

- 2 fois plus de trous à traiter
- pas de contrainte d'unicité de l'outillage

Questions



RENAULT KADJAR