

## Optimisation des ressources en gare de triage pour FRET SNCF

**Responsables :** Juliette Pouzet, chef de projet, [juliette.pouzet@sncf.fr](mailto:juliette.pouzet@sncf.fr)  
Ariane François, ingénieure de recherche, [a.francois@sncf.fr](mailto:a.francois@sncf.fr)

## 1 Présentation du problème

Dans le fret ferroviaire, les gares de triage sont les nœuds par excellence par lesquels transitent les plus gros flux de marchandises. En effet, un grand nombre de flux de marchandises, défini par une gare d'origine, une gare de destination et des horaires de mise à disposition et de livraison à respecter, est acheminé par « wagons isolés ». Il s'agit de groupes de wagons empruntant plusieurs trains successifs, mutualisés avec des wagons d'autres clients. Ce fonctionnement

Les gares de triage permettent de réorganiser les trains de « wagons isolés » grâce à un enchaînement de **tâches machines** et **tâches humaines**. C'est l'équivalent des correspondances que réalisent les voyageurs lorsqu'ils empruntent plusieurs trains.

Une gare de triage est décrite par trois chantiers (voir Figure 1) qui permettent d'effectuer les correspondances de chaque wagon. On distingue :

- Le Chantier Réception sur lequel les trains arrivent et où les wagons vont être séparés pour être poussés sur la Bosse (i.e. débranchés) par la « machine de débranchement »,
- Le Chantier Formation sur lequel les wagons vont tomber un à un avant d'être rapprochés et raccordés (i.e. formés) par la « machine de formation »,
- Le Chantier Départ sur lequel les trains vont être déplacés du Chantier Formation au Chantier Départ (i.e. dégarés) par la « machine de dégarage » pour ensuite être préparés et repartir.

Sur chacun des chantiers, des tâches humaines doivent être réalisées par des « roulements d'agents » (i.e. groupes d'agents ayant les mêmes compétences et cycles horaires). Ces agents ont un rythme de travail en 3x8 (i.e. 8 heures de travail consécutives). Il est donc nécessaire de construire des **journées de service** (enveloppes de 8h), en définissant un horaire à chaque tâche et en l'attribuant à la journée de service d'un roulement qualifié pour la réaliser. Cette construction de journées de service est considérée optimale si toutes les tâches sont couvertes avec un minimum de journées de service.

La complexité d'optimiser ces tâches machines et humaines réside dans les particularités suivantes :

- Les tâches sont liées les unes aux autres par des liens de précedence et de parallelisation.
- Pour chaque machine, une seule tâche peut être réalisée à la fois.
- Les tâches humaines sont de durées courtes, allant jusqu'à la minute.
- Certains agents peuvent se déplacer entre chantiers avec un temps de repositionnement associé.

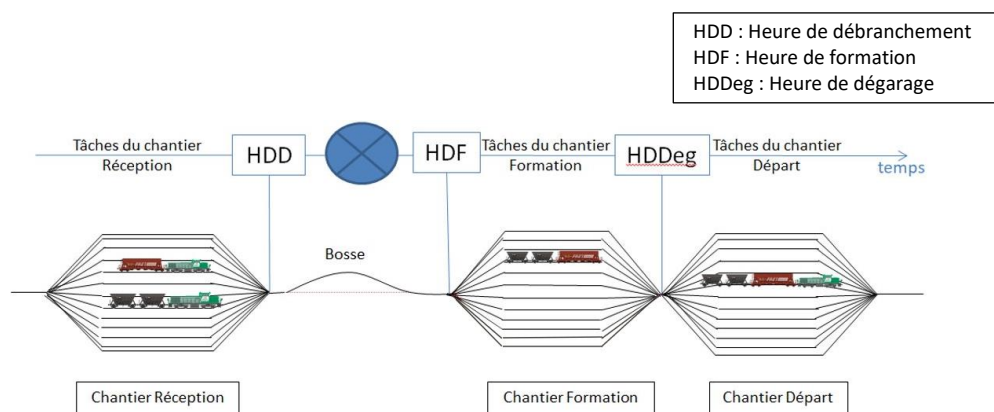


Figure 1 – Tâches machines et humaines en gare de triage

## 2 Données

Chaque instance est composée de deux fichiers :

- Un fichier XML (Figure 2) décrivant la géographie de la gare : nombre de voies sur chaque chantier, horaire de fonctionnement de chaque chantier et chaque machine, durée de chaque tâche machine.
- Un fichier principal Excel contenant toutes les autres données (liste des trains, des tâches humaines, des roulements d'agents, etc.). L'instance la plus grande est composée de 152 trains à l'arrivée, 144 trains au départ et 1254 tâches humaines.

```
<grillesHoraire>
  <grilleHoraire id="horaires_WPY_FOR">
    <Ouverture jours="1;2;3;4;5" heureOuverture="13:00" heureFermeture="13:00"/>
    <Ouverture jours="6" heureOuverture="21:00" heureFermeture="13:00"/>
    <Ouverture jours="7" heureOuverture="21:00" heureFermeture="13:00"/>
  </grilleHoraire>
  <grilleHoraire id="horaires_WPY_H24">
    <Ouverture jours="1;2;3;4;5;6;7" heureOuverture="00:00" heureFermeture="00:00"/>
  </grilleHoraire>
</grillesHoraire>

<Gare nomGare="WPY" CrdPrimaire="WPY">
  <machines>
    <machine nom="machineDEB" dureeCreneau="15">
      <typeTache nom="Debranchement" nbCreneau="2"/>
      <periode jourDebut="01/01/2020" jourFin="31/12/2022" grilleHoraire="horaires_WPY_H24"/>
    </machine>
    <machine nom="machineFOR" dureeCreneau="15">
      <typeTache nom="Formation" nbCreneau="1"/>
      <periode jourDebut="01/01/2020" jourFin="31/12/2022" grilleHoraire="horaires_WPY_H24"/>
    </machine>
    <machine nom="machineDEG" dureeCreneau="15">
      <typeTache nom="Degarage" nbCreneau="1"/>
      <periode jourDebut="01/01/2020" jourFin="31/12/2022" grilleHoraire="horaires_WPY_H24"/>
    </machine>
  </machines>
  <chantierReception nomSite="WPY_REC" nbVoies="15">
    <periode jourDebut="01/01/2020" jourFin="31/12/2022" grilleHoraire="horaires_WPY_H24"/>
  </chantierReception>
  <chantierFormation nomSite="WPY_FOR" nbVoies="48">
    <periode jourDebut="01/01/2020" jourFin="31/12/2022" grilleHoraire="horaires_WPY_FOR"/>
  </chantierFormation>
  <chantierDepart nomSite="WPY_DEP" nbVoies="14">
    <periode jourDebut="01/01/2020" jourFin="31/12/2022" grilleHoraire="horaires_WPY_H24"/>
  </chantierDepart>
</Gare>
```

Figure 2 - Exemple de fichier XML d'entrée

Chaque fichier principal Excel est composé de 6 onglets :

- « Sillons » (Figure 3) : Liste des trains arrivant et repartant de la gare (id, jour, heure).
- « Correspondance » (Figure 4) : Liste des flux qui transitent dans la gare.
- « Tâches humaines » (Figure 5) : Liste des tâches humaines à effectuer sur chaque train, avec les liens de précedence et de parallélisation (entre tâches humaines et également avec les tâches machine). L'indice « DEB= » signifie par exemple que la tâche doit être faite pendant le débranchement.
- « Roulements » (Figure 6) : Liste des roulements avec le nombre d'agents disponibles par jour et leurs cycles horaires.
- « Connaissances » (Figure 7) : Liste des tâches dont chaque roulement est habilité.
- « Repositionnements » (Figure 8) : Liste des temps de déplacement à considérer lorsqu'un agent enchaîne deux tâches sur des chantiers différents. Les temps ne sont pas forcément symétriques.

	A	B	C	D	E	F	G
1	n°TRAIN	LDEP	HDEP	JDEP	LARR	HARR	JARR
2	431802	CCX	00:00	09/08/2022	WPY_REC	03:00	09/08/2022
3	54003	WPY_DEP	03:59	10/08/2022	SIB	00:59	09/08/2023
4	...	...	...	...	...	...	...

Figure 3 - Onglet "Sillons" du fichier Excel d'entrée

	A	B	C	D	E
1	id	jour départ	origine	n°train	destination
2	1	09/08/2022	CCX	431802	WPY
3	1	10/08/2022	WPY	54003	SIB
4	...	...	...	...	...

Figure 4 - Onglet "Correspondances" du fichier Excel d'entrée

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Id tâche	Nom type de tâche	Jour sillon	Indication heure	Duree	Id sillon	Site/Origine	Predecesseurs
2	A1_431802#09/08/2022#A	arrivée Reception	09/08/2022	A+	15	431802	WPY_REC	
3	A2_431802#09/08/2022#A	préparation tri	09/08/2022	A+	45	431802	WPY_REC	A1_431802#09/08/2022#A
4	A3_431802#09/08/2022#A	débranchement	09/08/2022	DEB=	20	431802	WPY_REC	A2_431802#09/08/2022#A
5	...	...	...	...	...	...	...	...
6								

Figure 5 - Onglet "Tâches humaines" du fichier Excel d'entrée

	A	B	C	D	E
1	Roulement	Jours de la semaine	Site de PS/FS	Nombre agents	Cycles horaires
2	3X8 VTE	1;5	WPY_FOR	2	13:00-21:00;21:00-05:00
3	3X8 VTE	2;3;4	WPY_FOR	3	13:00-21:00;21:00-05:00;05:00-13:00
4	...	...	...	...	...

Figure 6 - Onglet "Roulements" du fichier Excel d'entrée

	A	B
1	Roulement	Nom type de tâche
2	3X8 VTE	attelage véhicules
3	3X8 VTE	Remontee
4	...	...

Figure 7 - Onglet "Connaissances" du fichier Excel d'entrée

	A	B	C
1	Lieu depart	Lieu arrivee	Duree
2	WPY_REC	WPY_FOR	0
3	WPY_REC	WPY_DEP	15
4	...	...	...

Figure 8 - Onglet "Repositionnements" du fichier Excel d'entrée

### 3 Travail à réaliser

Les séances de travail accompagnées par les personnes de SNCF permettront d'avoir des précisions sur les enjeux et le besoin métier du prototype. Les intervenants vous aideront également dans vos choix de modélisation, qui sera un élément primordial pour ce projet.

En termes de langage de programmation, il est suggéré d'implémenter vos modèles en JAVA ou Python, avec l'utilisation de Gurobi pour une optimisation exacte. Il pourra cependant être judicieux d'utiliser une/des heuristiques pour diminuer les temps d'exécution.

Un ensemble de 4 instances sera fourni (2 instances de petites tailles et 2 instances de taille réelles) et toutes les instances devront être testées à chaque jalon. C'est donc la modélisation qui se complexifiera et non la taille des jeux de données.

### 4 Jalons

A chaque jalon, un rapport (Word ou Latex), complété au fur et à mesure, sera rendu contenant :

- Les réflexions de modélisation et la justification du modèle choisi.
- La description mathématique du modèle et des algorithmes utilisés.
- Les résultats obtenus pour chaque instance (fichiers Excel décrits dans les sections suivantes) avec les performances associées.

**NB** : Pensez à indiquer la machine (processeur, mémoire vive) utilisée pour résoudre les instances.

- Vos remarques et analyses avec les difficultés rencontrées.

#### 4.1 Premier jalon : Optimisation des tâches machines

Dans un premier temps, il est demandé de proposer un modèle qui optimise les tâches machines en gare de triage. L'objectif est de déterminer un créneau horaire pour toutes les tâches machines, en respectant les contraintes de fonctionnement du triage. Il n'y a pas d'optimisation des tâches humaines ; ce qui devrait limiter la complexité du modèle et permettre de rester dans des temps de calcul assez courts (moins de 30 min pour les instances de grandes taille).

Le modèle doit tenir compte des considérations suivantes :

- Respecter le nombre de voies disponibles sur chaque chantier
- Respecter les horaires d'ouverture de chaque chantier
- Respecter les horaires de fonctionnement de chaque engin moteur
- Assurer un temps minimal entre les tâches machines pour pouvoir effectuer les tâches humaines
- Attribuer un créneau horaire à toutes les opérations en respectant la disponibilité des machines

	A	B	C	D	E	F
1	Id tâche	Type de tâche	Jour	H début	Durée	Sillon
2	DEB_43110#03/08/2022#A	DEB	04/08/2022	05:00	20	43110#03/08/2022#A
3	DEB_54234#03/08/2022#A	DEB	04/08/2022	14:31	20	54234#03/08/2022#A
4	...	...	...	...	...	...

Figure 9 - Exemple de fichier de sortie (tâches machines)

Vous devez fournir les solutions que vous avez obtenues pour chaque instance dans un fichier Excel, selon le format de la Figure 9. Pour compléter les résultats, un indicateur métier devra apparaître en sortie : les pics d'occupation des voies. Le format de cet indicateur est libre mais il devra à minima permettre de retrouver les informations de la Figure 10.

Occupation des voies par chantier (optim)	WPY_REC	WPY_FOR	WPY_DEP
Taux max d'occupation des voies (en %)	60	80	100
Nombre max de voies occupées	9	32	14
Nombre total de voies à disposition	15	40	14

Figure 10 – Exemples d'indicateurs d'occupation des voies

**1<sup>er</sup> livrable : 03 mars 2023**

#### 4.2 Deuxième jalon : Optimisation des tâches humaines

La seconde phase du projet a pour objectif de minimiser le nombre de journées de service nécessaires pour couvrir toutes les tâches humaines à réaliser (en plus de fixer l'horaire des tâches machines). Le nouveau modèle doit tenir compte des considérations suivantes (en plus des précédentes) :

- Déterminer l'horaire optimal de toutes les tâches humaines
- Affecter un maximum de tâches à une journée de service (rattachée à un roulement d'agents)
- Utiliser un minimum de journées de service
- Ne pas dépasser le nombre de journées de service chaque jour, pour chaque roulement
- Respecter les connaissances tâches de chaque roulement pour l'ensemble des journées de service qui lui sont affectées

Cette première modélisation est demandée en considérant que les agents ne peuvent pas se déplacer entre différents chantiers au cours d'une journée de service.

Les mêmes fichiers de sorties sont demandés pour chaque instance, avec en plus la liste des journées de service avec l'horaire attribué à chaque tâche, selon le format de la Figure 11.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Id JS	Ordre T	Type T	Sillon	Début T	Fin T	Durée T	Lieu T	Roulement
2	3X8 VTE_5_07/08/2022		1 attelage véhicules	431107#08/08/2022#D	07/08/2022 23:13	08/08/2022 01:42	149 WPY_FOR	3X8 VTE	
3	3X8 VTE_5_07/08/2022		2 attelage véhicules	431035#08/08/2022#D	08/08/2022 01:51	08/08/2022 04:20	149 WPY_FOR	3X8 VTE	
4	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Figure 11 - Exemple de fichier de sortie listant les journées de service

Il faudra également en indicateur, le nombre de journées de service utilisées et la répartition, par jour et par roulement (voir exemple en Figure 12).

	Nb de JS activées	08/08/2022	09/08/2022	10/08/2022	11/08/2022	12/08/2022	13/08/2022	14/08/2022	Total
3X8 VTE		1	3	3	3	2	1	2	15
Chef de manoeuvre D		1	1	2	3	3	2	2	14
Total		2	4	5	6	5	3	4	29

Figure 12 - Exemple d'indicateurs du nombre de journées de service utilisées

**2<sup>ème</sup> livrable : 15 mars 2023**

### 4.3 Troisième jalon : Prise en compte des repositionnements des agents

L'un des aspects les plus difficiles à prendre en compte, sans trop complexifier le modèle est le repositionnement nécessaire lorsque deux tâches de chantiers différents sont à enchaîner. C'est cet aspect qui sera à prendre en compte pour le troisième jalon. Afin de ne pas trop augmenter les temps de calculs, le recours à une(des) heuristique(s) sera étudié.

Les fichiers de sortie seront les mêmes que pour le jalon 2.

**Livrable final : 31 mars 2023**

## 5 Critères d'évaluation

L'évaluation porte d'une part sur des critères relatifs à la qualité de la production tels que :

- La pertinence des modèles : complexité, choix du type de variables, etc.
- La qualité du code développé : développer le code sur un repo Git, écrire un README, structurer le code, etc. Pour cela nous pouvons aussi vous accompagner, avec l'utilisation par exemple de pylint.
- Les performances obtenues ;
- La critique des modèles / algorithmes développés et des résultats obtenus ;
- La qualité des rendus.

Elle porte d'autre part sur des critères relatifs au processus de travail du groupe :

- La prise d'initiatives ;
- Le travail d'équipe.

## 6 Bibliographie

L'optimisation des gares de triages a déjà été étudiée par le passé et vous trouverez ci-dessous une liste de références bibliographique (non exhaustive) que vous pouvez consulter.

### Références

- [1] Samuel Deleplanque, Paola Pellegrini and Joaquin Rodriguez. Optimization of a railway freight yard in real time, 2018.
- [2] Edwin R. Kraft. A hump sequencing algorithm for real time management of train connection reliability. Journal of the Transportation Research Forum. Vol. 39. No. 4, 2000.

- [3] Haodong Li, Mingzhou Jin, and Shiwei He. Sequencing and Scheduling in Railway Classification Yards. *Transportation Research Record* 2475.1 : 72-80, 2015.
- [4] Thomas Winter and Uwe Zimmermann. Real-time dispatch of trams in storage yards. *Annals of Operations Research* 96.1-4 : 287-315, 2000.
- [5] Sam Yagar, Frank Frank Saccomanno and Q. Shi. An Efficient Sequencing Model for Humping in a Rail Yard. *Transportation Research Part A*, Vol. 17, No 4, pp 251–262, 1983.