
Modélisation et simulation du FRTSP

1. Introduction

Dans le présent chapitre, nous nous concentrerons sur la problématique qui est au cœur du système de transport ferroviaire intégrant le flux de marchandises avec le flux voyageurs. Nous nous plaçons dans le cas de mixité maximal des ressources du système, car si ce niveau de mixité est évalué, comme une perspective techniquement et économiquement plausible, alors tous les autres le seront également. Comme cela a été mis en évidence dans le second chapitre dans la figure II.13, le FRTSP est central et critique par rapport aux autres problèmes décisionnels qui se posent. Ainsi, la faisabilité de la solution de mixité est conditionnée par les performances réalisées à ce niveau. Plus précisément, si les trains de passagers démontrent leur capacité à absorber une quantité de marchandises suffisamment significative, alors la rentabilité de cette solution sera prouvée. Par conséquent, il nous a semblé plus pertinent d'aborder en premier le FRTSP, pour ensuite s'intéresser aux autres problématiques identifiées et directement liées à celui-ci.

Cette solution de mixité n'existe pas encore, hormis quelques expérimentations à échelle réduite, dans certaines villes. Pour comprendre l'impact de l'intégration du flux de marchandises, sur le réseau ferroviaire de transport de voyageurs, il est nécessaire de passer à une échelle supérieure. Cependant, une expérimentation à grande échelle, serait trop coûteuse et nécessiterait la mobilisation d'importantes ressources. De plus, comme mentionné dans le chapitre 2, l'opérateur de transport de voyageurs n'a pas encore le droit d'assurer ce service, d'où, l'impossibilité de procéder à une telle expérimentation. Dans ce cas, la démarche usuelle suggère l'utilisation de la simulation. Quelques arguments supplémentaires soutiennent cette proposition :

- Le déploiement de l'expérimentation sur le terrain requiert un investissement élevé, le modèle de simulation permet d'évaluer les performances avant l'engagement des fonds.
- Dans les deux articles suivants (Dessouky & Leachman, 1995) et (Motraghi & Marinov, 2012), il est mis en évidence la complexité des réseaux ferroviaires en raison de plusieurs facteurs, ce qui rend difficile le développement de modèles analytiques. A contrario, les modèles de simulation permettent une expérimentation à faible coût, ainsi qu'une modélisation réaliste avec une meilleure représentation de la dynamique et de la complexité du système ferroviaire, ce qui peut conduire à des résultats et des conclusions précis.
- Enfin, la simulation peut être couplée avec des modèles d'optimisation, dans le but de fournir un outil d'aide à la décision performant (Borodin, et al., 2017)

Ce chapitre sera structuré en deux parties principales. La première partie concerne la définition du FRTSP et de ses différentes hypothèses. La seconde partie sera dédiée au développement du modèle de simulation avec ARENA.

2. Hypothèses et description du FRTSP

Le schéma de décomposition proposé dans le second chapitre, permet de définir des sous problèmes, ayant des complexités moindres et pouvant être adressés les uns après les autres.

Néanmoins l'interdépendance des sous problèmes impose des contraintes supplémentaires. A ce stade de l'étude, et en l'absence d'un modèle économique d'une part, et en ignorant les technologies devant être utilisées, nous faisons le choix de privilégier l'étude de l'intégration du flux de marchandises avec le flux de voyageurs. Dans ce chapitre, nous proposons de définir un cadre précis pour ce problème, pour ensuite le modéliser et le résoudre.

Concernant le choix du niveau de mixité totale, comme dit précédemment, il correspond au cas le plus difficile à mettre en œuvre, au vu de son niveau de contraintes, aussi bien organisationnelles, que techniques. Les avantages de ce niveau de mixité peuvent être résumés comme suit :

- Montrer la faisabilité de tous les autres niveaux, à travers la séparation de chacune des ressources partagées initialement, pour aller vers une ressource dédiée à chacun des flux.
- L'implémentation de ce cas de mixité, ne requiert pas la mobilisation de trains supplémentaires, exclusive pour le transport de marchandises.
- Le transport de marchandises ne requiert pas la mobilisation de conducteurs supplémentaires.
- Sachant que les trains doivent circuler pour assurer l'activité de transport de voyageurs, le transport de marchandises ne requiert pas une consommation supplémentaire de ressources (à noter que le transport d'un poids supplémentaire, implique une surconsommation énergétique. Toutefois, cette dernière reste négligeable, comparativement à la mise en circulation d'un nouveau train).

2.1. Hypothèses du FRTSP

En raison de l'interdépendance des 9 sous-problèmes (voir figure II.13), il est nécessaire de faire quelques hypothèses sur les paramètres liés au FRTSP. Ainsi, pour chacune de ces dernières, nous avons :

- **Hypothèse 1 : 1^{ère} et 2^{ème} problématiques - zones de stockage temporaire**
Cette problématique concerne le dimensionnement des zones de stockage temporaire. Deux cas se présentent, soit les stations sont à construire et cet espace devrait être dimensionné, d'après l'étude de la circulation du flux de marchandises. Soit les stations existent déjà et auquel cas, cet espace sera une contrainte forte qu'il faudra intégrer lors de la modélisation du FRTSP.
Comme nos travaux ont été initiés avec la projection de ce nouveau service, dans le cadre du projet du « Grand Paris Express », nous nous sommes placés dans le premier cas en considérant que l'espace n'est pas contraint encore, ce qui permet de :
 - Ne pas contraindre davantage le système, en raison d'un manque d'espace en amont et en aval du processus de transport.
 - Se focaliser sur la capacité du système de transport de passagers, à absorber un flux supplémentaire, pour mieux utiliser cet espace vide inoccupé.

Toutefois, la relaxation de la contrainte spatiale pour le stockage devrait permettre d'évaluer le manque à gagner, dans le cas où cet espace serait insuffisant dans

certaines stations. Malgré le peu de place disponible en milieu urbain, il peut être réalisable d'augmenter les capacités des stations dans le cas de certaines stations.

- **Hypothèse 2 : 3^{ème} problématique - dimensionnement des trains**

L'attribution d'un espace dédié au transport de marchandises, à l'intérieur d'un train de voyageurs, dépend de deux éléments :

- La capacité résiduelle initialement prévue pour le transport de voyageurs, pouvant être exploitée pour le transport de marchandises.
- La demande de transport potentielle sur la période considérée (i.e. avec les horaires d'arrivée des marchandises à transporter, à leur station de départ).

Comme dans un système de transport, une des difficultés majeures est de minimiser l'écart entre la capacité disponible (quasi constante) et la demande correspondant au flux de fret, qui est intrinsèquement variable, la capacité dédiée au transport de marchandises sera fixée pour tous les trains. Pour cela, nous allons nous baser sur les estimations préliminaires, de l'opérateur de transport en région Ile-de-France (études du PREDIT présentées au chapitre 2).

- **Hypothèse 3 : 4^{ème} et 5^{ème} problématiques - problèmes de bin packing dans les zones de stockage temporaire**

Dans le chapitre 2, nous avons soulevé l'importance du rangement des marchandises, dans les zones de stockage temporaire. Cette problématique a un impact direct sur le temps de disponibilité des colis pour être chargés, en raison des temps de transfert et d'accès à ces colis. Ces temps dépendent directement des moyens de manutention et de la politique de placement des colis dans les zones de stockage. Une modélisation plus fine pourrait nous amener à définir un temps de disponibilité par colis et non plus par commande (qui peut être composée de plusieurs colis), afin de se rapprocher plus de la réalité. Dans un premier temps, nous considérons que la commande est disponible entièrement au même moment pour être chargée et que la définition du temps de disponibilité est déterminé en amont du FRTSP.

- **Hypothèse 4 : 6^{ème} problématique - planification des trains**

La planification des trains, peut être un levier d'ajustement de l'offre de transport à la demande. Cependant, à ce stade, l'objectif est de montrer le potentiel d'absorption d'un flux additionnel, avec le planning actuel de circulation des trains de passagers, durant les heures creuses de la journée.

- **Hypothèse 5 : 7^{ème} problématique - problèmes de bin packing à l'intérieur des trains**

Il est indéniable que les temps de chargement et de déchargement des commandes, sont variables et qu'ils dépendent du nombre de colis constituant les commandes et de leur placement dans le train. Dans le présent travail, nous allons faire une estimation d'un temps moyen de chargement / déchargement de chaque colis.

La détermination de ce temps pourra être plus précise une fois que les technologies à adopter seront connues.

- **Hypothèse 6 : 8^{ème} problématique - livraison des marchandises dans la station de départ**

La distribution décrivant le comportement des moments de réception des commandes à leur station de départ, a un impact direct, sur les différentes composantes du système de transport, telles que:

- Les ressources de manutention.
- L'espace de stockage temporaire.
- L'espace dédié au fret dans les trains.

La mise en place d'un système de régulation des arrivées des marchandises, est indispensable à une rationalisation de l'utilisation des différentes ressources mobilisées.

A ce stade préliminaire, nous admettons qu'aucune action n'est entreprise, pour influencer sur les moments d'arrivée des commandes, aux stations de départ.

A noter que toutes ces hypothèses, ne remettent pas en question la possibilité de mettre en œuvre une telle solution de transport. Toutefois, elles conduiront à une exploitation sous-optimale de cette dernière. D'autre part, elles peuvent être retenues comme première étape d'une mise en œuvre progressive. Tout en sachant, qu'une fois la dynamique de circulation des flux de marchandises étudiée, à travers l'étude du FRTSP, ces problématiques pourront être étudiées, au vu des dépendances citées précédemment.

2.2. Formalisation du FRTSP

Les décisions inhérentes au séjour d'une marchandise, peuvent être décrites comme suit :

- Réception et insertion dans la file d'attente des marchandises → la définition d'un emplacement dans l'espace de stockage temporaire de la station.
- Décision de les transporter par un train précis → ceci implique la détermination du moment auquel elles seront transportées.
- Chargement des marchandises dans le train → ceci nécessite le respect de plusieurs contraintes telles que le temps d'arrêt du train et l'espace restant.
- Le train transporte chaque marchandise sur le tronçon de la ligne défini par sa station de départ et sa station d'arrivée → ceci implique un certain temps de parcours, dépendant de tous les chargements et déchargements sur le tronçon en question.
- Déchargement des marchandises dans leur station d'arrivée → ceci nécessite un certain temps d'arrêt du train et l'espace pour accueillir la marchandise.

Même si la relaxation de la limite physique est plausible à ce stade préliminaire de l'étude, il n'en est pas moins que durant la phase d'exploitation, cette préoccupation sera majeure en milieu urbain. De plus, la question du cash-flow généré étant prédominante, cela nous a conduit à considérer la maximisation du taux de rotation en minimisant le temps d'attente des marchandises avant leur chargement dans le train. Cet objectif a pour conséquence directe, l'accélération de libération de l'espace occupé pour tirer le flux de marchandises en attente dans les zones intermédiaires. D'autres conséquences intéressantes sont à relever, à savoir :

- La livraison des marchandises au plus tôt (argument commercial très fort).

- Une meilleure utilisation de l'espace dédié aux marchandises dans les trains, accélérant la rentabilité de la nouvelle solution
- L'augmentation de la fluidité dans le système de transport permettra la prise en charge de nouvelles demandes de transport plus rapidement.

Pour rappel, le FRTSP correspond au cas mono-ligne, ce qui correspond au cas particulier qui doit être étudié en premier, avant de pouvoir envisager une généralisation, vers le cas multi-ligne, voire multimodes. En pratique, ce cas devrait être celui ayant le plus de chances d'être déployé, au vu des inconvénients liés au changement de ligne, voire changement de mode.

Une représentation graphique est proposée dans la Figure IV.1, pour mettre en évidence le phénomène de files d'attente qui modélise la dynamique des événements du problème. En particulier, les trains constituent eux même une file d'attente, de même pour chaque station de chargement, pour laquelle il y a une file d'attente des colis en attente d'être transportés. Les caractéristiques de cette ligne ferroviaire et des différentes composantes du service de transport étudié, peuvent être décrites comme suit :

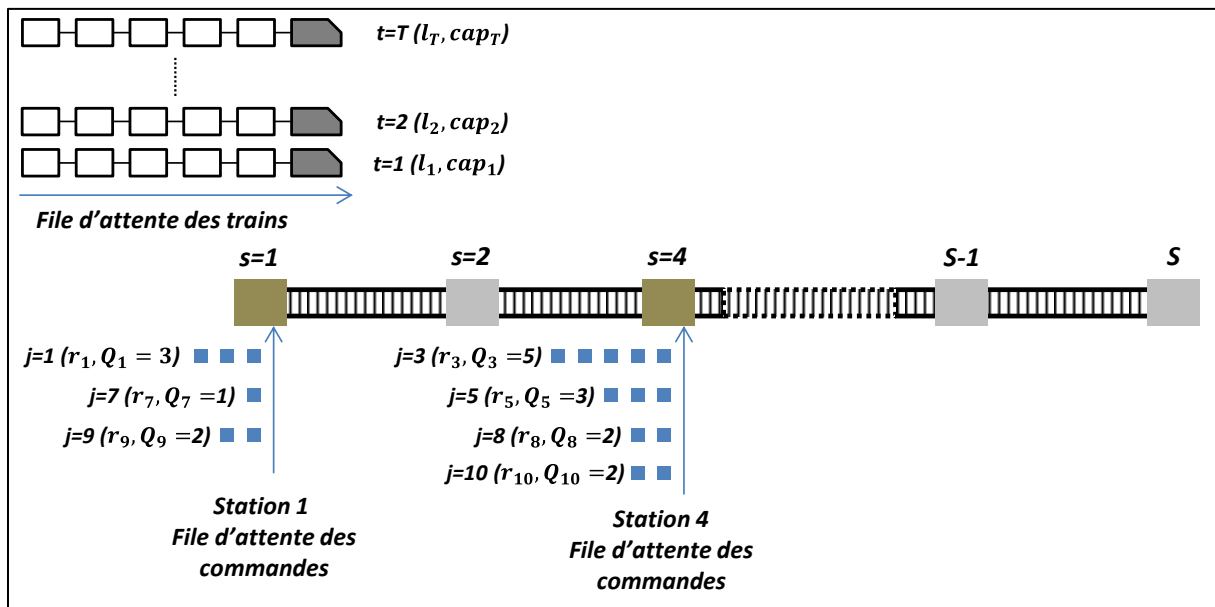


Figure IV.1 : Illustration des files d'attente dans le FRTSP

- La ligne ferroviaire est composée de S stations de voyageurs. Chaque station peut éventuellement être utilisée pour charger les marchandises dans les trains. L'ensemble qui sera retenu, regroupera uniquement les stations mutualisées. Par conséquent, cet ensemble ne coïncide pas forcément avec l'ensemble de toutes les stations de la ligne.
- L'activité de transport de marchandises est effectuée durant les heures creuses de la journée.
- Les marchandises à transporter sont mises dans des conteneurs de taille standard, qu'on appellera « colis ». Ces conteneurs peuvent se présenter avec des roues, tels que dans l'exemple montré dans la Figure IV.2. Ce type de conteneur présente deux avantages :
 - Facilité de manutention, aussi bien dans les stations, qu'à l'intérieur des trains.

- Il est déjà utilisé dans l'approvisionnement des magasins en ville, ainsi que par les services postaux (transport groupé de colis).

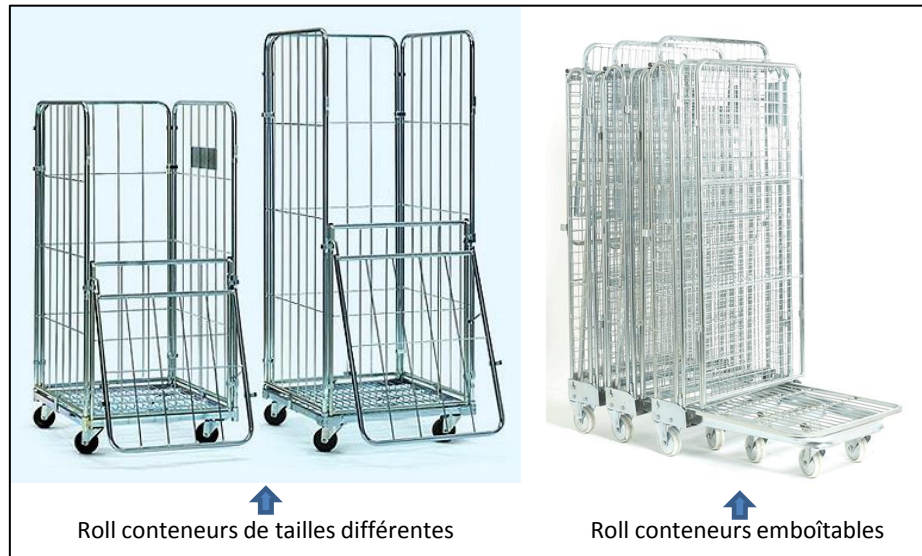


Figure IV.2 : Exemple de conteneurs pour le transport de marchandises

- Les demandes de transport transmises par les clients seront appelées « commandes » dans la suite. Durant chaque période d'exploitation considérée, nous aurons J commandes à transporter. Chaque commande sera caractérisée par :
 - Une taille exprimée en nombre (entier) de colis standards, notée Q_j .
 - Une date de disponibilité, représentant la date de prise en charge au plus tôt par un train, à partir de la station de départ. Elle est notée r_j .
 - Un parcours unique sur la ligne. Ainsi, chaque commande aura une station de départ (notée dep_j) et une station d'arrivée (notée arr_j), indépendantes des autres commandes.
 - Chaque colis standard requiert le même temps de chargement et de déchargement, notée $time$ (i.e. une commande constituée de 2 colis nécessitera deux fois plus de temps, qu'une commande n'ayant qu'un seul colis).
 - Chaque commande doit être transportée entièrement par le même train, entre dep_j et arr_j . En d'autres termes, il n'est pas permis de fractionner une commande composée de plusieurs colis.

L'ensemble des commandes est supposé fixé et connu à l'avance, pour l'établissement du plan de transport prédictif. Lors de l'extension en considérant la replanification de ce plan de transport, nous autoriserons la prise en compte d'une liste de commandes pouvant subir des changements.

- L'ensemble des trains est connu également à l'avance, il y a T trains. On considère uniquement les trains de voyageurs, disposant d'un espace dédié aux marchandises. Ainsi, les trains exclusivement dédiés au transport de voyageurs, qui pourront continuer à circuler, sont exclus de cet ensemble de T trains). Les caractéristiques des trains et de leur parcours se présentent comme suit :

- Chaque train dispose d'une capacité maximale de transport de marchandises, exprimée en nombre de colis standards. Elle est notée cap_t .
- Chaque train a une date de départ connue, à partir de la première station de la ligne. Elle est notée l_t .
- Le parcours du trajet entre deux stations consécutives $(s, s + 1)$, requiert un certain temps, noté $tt_{s,s+1}$.
- Le temps d'arrêt minimum des trains dans chaque station est identique. Il est nécessaire pour la montée et la descente des voyageurs. Il est noté $wait_{min}$.
- Le temps d'arrêt maximum des trains dans chaque station est également identique. Il s'agit d'un levier pour permettre le chargement de commandes supplémentaires, sans faire attendre longtemps les voyageurs à l'intérieur du train. Il est noté $wait_{max}$.

Le temps d'attente effectif dans chaque station pour chaque train, dépendra des temps de chargement et de déchargement des colis dans la station en question. Néanmoins, ce temps est contraint par une borne inférieure qui est $wait_{min}$ et une borne supérieure qui est $wait_{max}$.

3. Une modélisation par simulation du FRTSP

Nous avons utilisé la simulation à événements discrets, dans le but de comprendre le comportement de cette solution de mixité totale, qui n'a pas encore été déployée à l'échelle réelle, du moins, pas dans les conditions que nous proposons de considérer. Au-delà de cette raison, se greffent d'autres avantages de cette approche qui peuvent être résumés comme suit :

- La présence des processus d'arrivée des trains, ainsi que des marchandises, impose d'elle-même leur modélisation par un logiciel de simulation de flux, qui est prévu à cet effet.
- Le couplage avec un modèle d'optimisation permet d'une part, la validation du modèle mathématique et d'autre part, l'évaluation des performances de la solution optimale dans un milieu incertain.

Dans la Figure IV.3, qui schématise le modèle de simulation de cette solution, on peut distinguer les deux sous-systèmes correspondant aux composantes dynamiques qui sont les trains et les commandes. De plus, le modèle est constitué des différentes stations composant la ligne simulée, ces dernières sont reliées par des blocs temporels simulant les temps nécessaires à la traversée des stations. Dans ce qui suit, nous détaillons chacune des parties du modèle comme suit :

3.1. Génération des commandes

Cette partie modélise le processus de génération du plan de commandes, pour une période d'exploitation. Deux scénarios seront évalués :

- Le premier scénario concerne la disponibilité préalable, des informations relatives aux commandes à transporter pour la prochaine période d'exploitation. Pour le modéliser, nous avons combiné deux blocs ARENA. Le premier « Create : Génération des

commandes initiales », permet la création d'autant d'entités que de commandes devant être transportées. La génération de toutes les entités est effectuée à l'instant 0. En ce qui concerne les caractéristiques de chaque commande, nous introduisons le second bloc « Assign ». Ce bloc nous permet d'affecter à chaque commande toutes ses caractéristiques (énoncées dans la section 3), à travers des attributs, auxquels sont attribuées des valeurs aléatoires régies par des distributions, dont les paramètres doivent être définis. La Figure IV.4 illustre ces deux blocs et leur paramétrage.

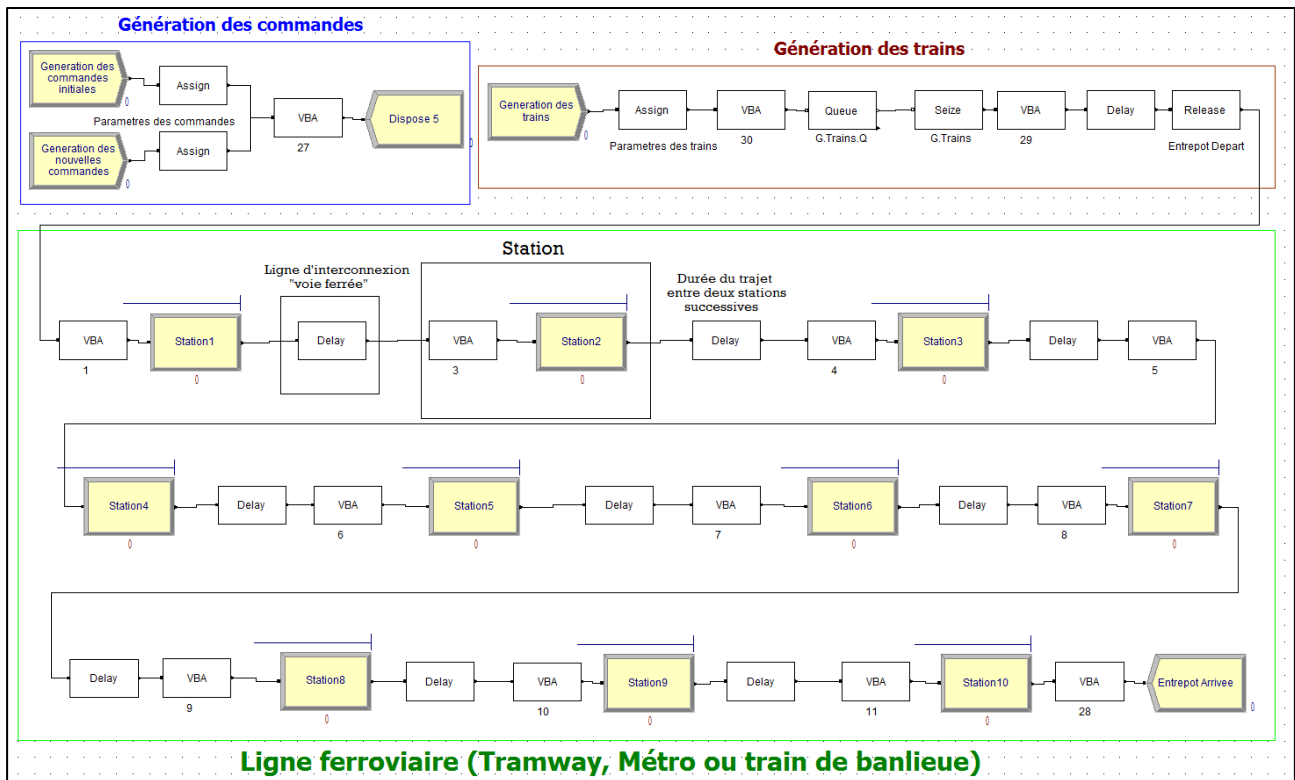


Figure IV.3 : Schéma du modèle de simulation du FRTSP en utilisant ARENA

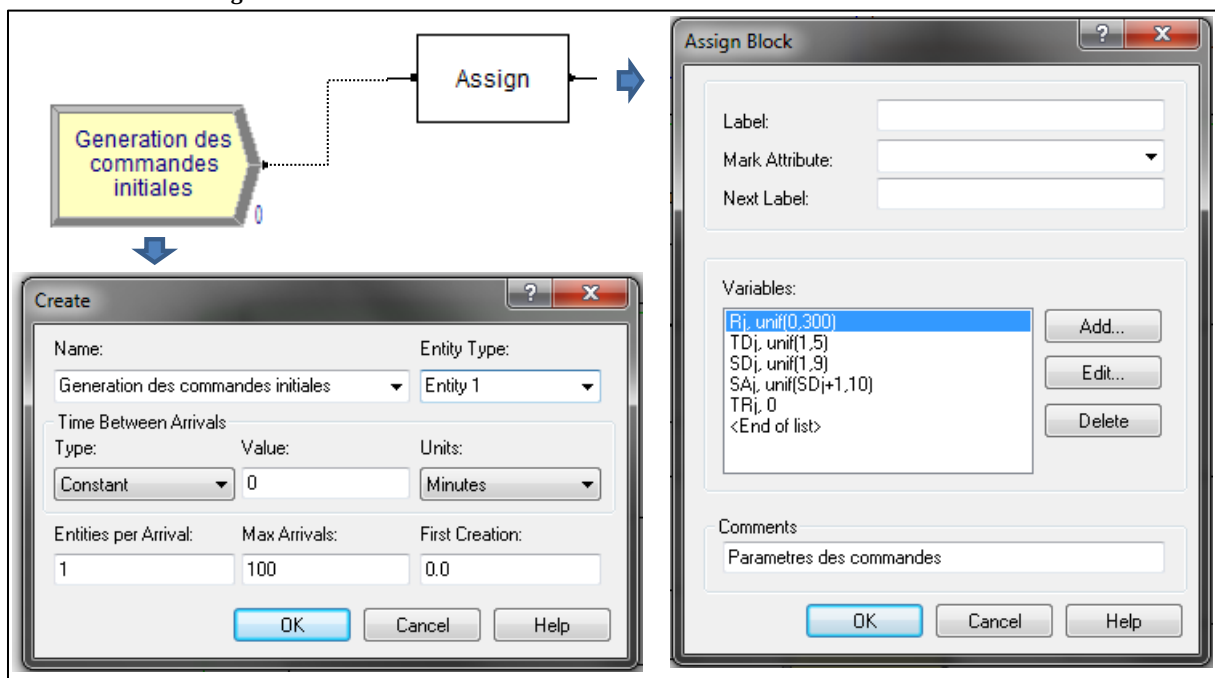


Figure IV.4 : Modélisation de la création du plan de commandes périodique

- Le second scénario est assez similaire au premier, au niveau de la modélisation. Cependant, en plus des commandes générées avant la période d'exploitation, d'autres commandes sont générées par le bloc « Create : Génération des nouvelles commandes », en temps réel de manière aléatoire. Ainsi, dans le bloc « Assign » l'attribut date de disponibilité de la commande (R_j) se verra affecter une valeur à partir de « TNOW », correspondant au moment courant. La Figure IV.5 illustre le paramétrage de ces deux blocs dans ce cas.

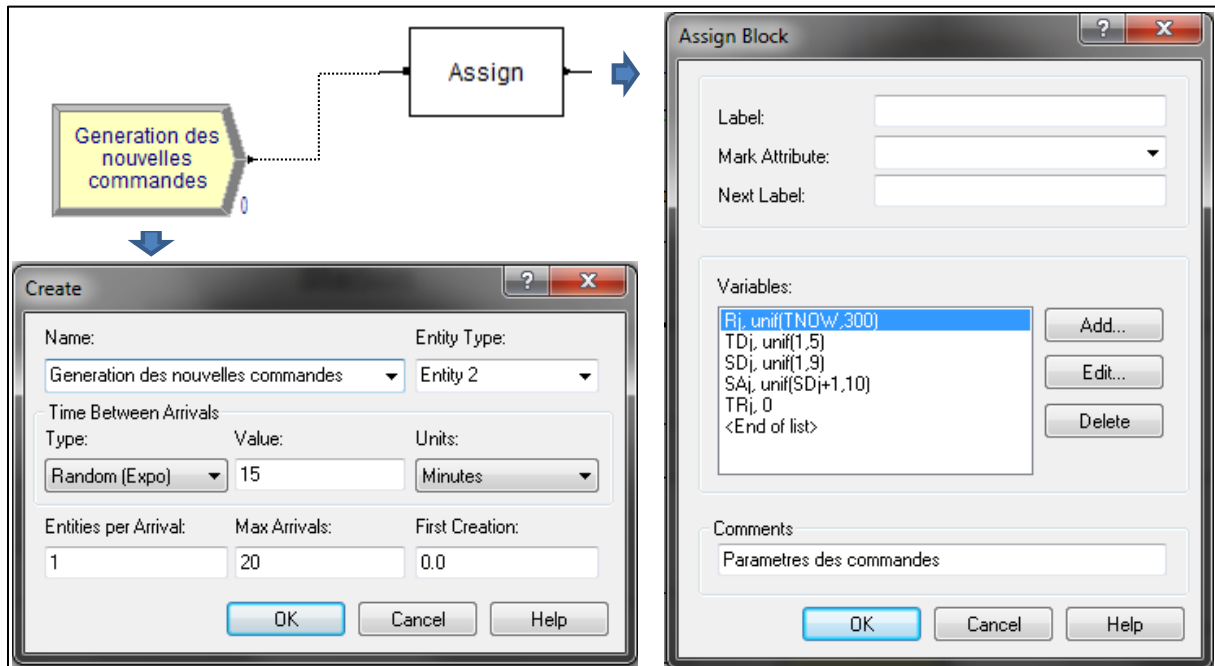


Figure IV.5 : Modélisation de la génération de commandes en temps réel

Le processus de génération des commandes se termine par deux blocs :

- Le bloc « VBA » : les données relatives à chaque commande, sont enregistrées dans un tableau dans l'environnement VBA. Ce tableau sera utilisé pour procéder aux différents calculs, nécessaires à la simulation du processus d'affectation des commandes aux trains. Cette dernière opération sera détaillée dans les points suivants.
- Le bloc « Dispose » : une fois les données du plan de commandes enregistrées, les entités modélisant ces commandes sont supprimées à travers le bloc « Dispose ».

L'affectation des commandes à leur station de départ, s'effectue directement dans l'environnement VBA. Ainsi, dès que le TNOW correspond à la date de disponibilité de la commande en question, elle sera affectée à la file d'attente de sa station de départ, en attendant son transport par un train.

3.2. Génération des trains

Le planning de circulation des trains est fixé avant chaque période d'exploitation. Hormis l'occurrence d'incidents, la date de mise en circulation de chaque train est connue à l'avance. Pour modéliser cette réalité opérationnelle, nous proposons une séquence de blocs ARENA, comme le montre la Figure IV.6.

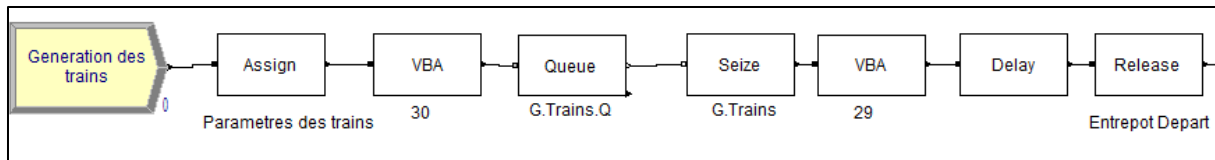


Figure IV.6 : Modélisation du processus de génération des trains

Les différents blocs utilisés dans cette séquence permettent d'effectuer les opérations suivantes :

- « Create : Génération des trains » : il s'agit de créer autant d'entités, que de trains devant parcourir la ligne, durant la période d'exploitation. Les entités sont toutes générées à l'instant 0.
- « Assign » : plusieurs attributs sont affectés pour chaque train, pour représenter ses caractéristiques. Dans la Figure IV.7, un exemple illustre les caractéristiques attribuées, telles que la date de mise en circulation du train (l'intervalle de temps avec le train qui le précède), l'initialisation du chargement et un numéro d'identification.
- La séquence « Queue », « Seize », « Delay » et « Release », modélise la mise en circulation effective des trains. Le bloc « Delay » temporise chaque train, le temps que sa date de mise en circulation arrive.
- Les blocs « VBA » : le premier enregistre dans l'environnement VBA, les données relatives à chaque train. Ces données sont utilisées dans les calculs nécessaires à la simulation du processus d'affectation des commandes aux trains. Le second bloc, permet d'ajuster les dates de mise en circulation des trains, en modifiant la valeur de la variable fixant le délai d'attente dans le bloc « Delay ».

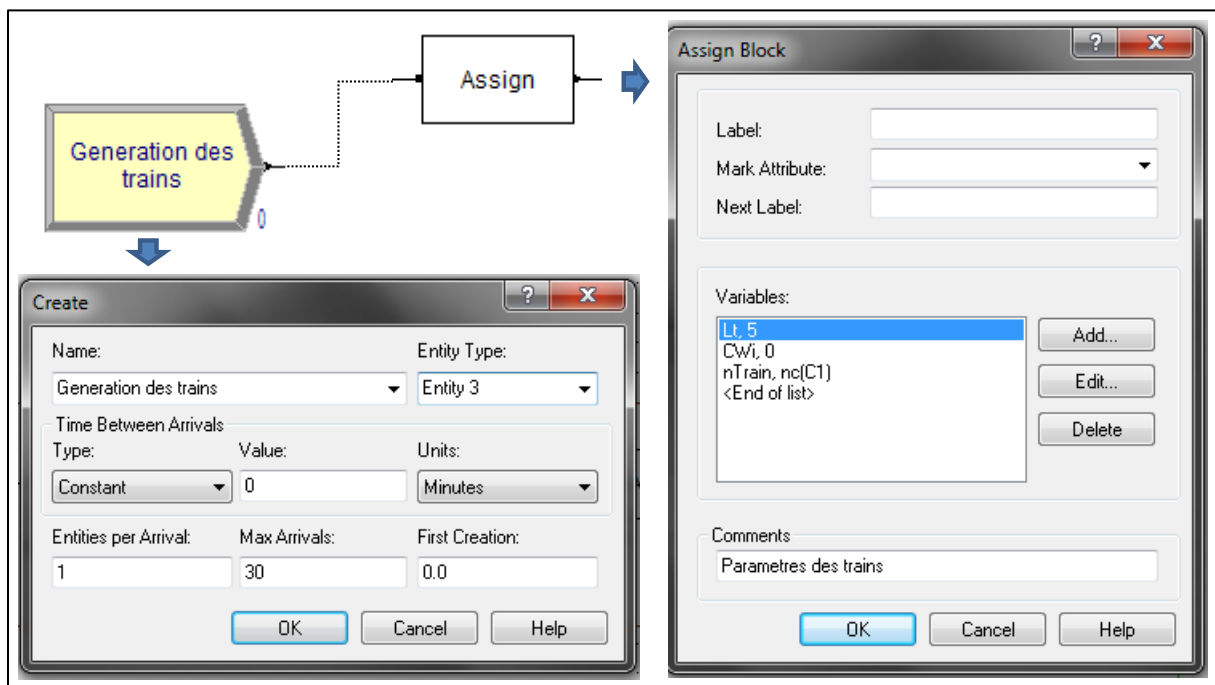


Figure IV.7 : Modélisation de la création des trains

3.3. La ligne ferroviaire

La modélisation de la ligne ferroviaire, comprend les deux composantes de cette dernière, à savoir :

- Les stations : elles sont modélisées par une séquence de blocs « VBA » et « Process », comme le montre la Figure IV.8.
 - Le bloc « VBA » : en fonction de la charge actuelle du train, du nombre de commandes devant être déchargées (en particulier, le temps nécessaire pour cela) et de la stratégie décisionnelle mise en œuvre, les commandes sont affectées à ce train ou laissées dans la station, en attente d'un autre train.
 - Le bloc « Process » : les calculs effectués dans le bloc « VBA », permettent de déterminer le temps d'arrêt de ce train (DLY2 dans la Figure IV.8), dans la station actuelle. Ce bloc est configuré en mode « Seize, Delay, Release » qui modélise l'occupation d'une ressource (la station), par un train, durant un certain délai.
- Les voies ferrées interconnectant les différentes stations : cette composante est modélisée par un bloc « Delay », qui traduit la distance à parcourir par un train entre deux stations successives, par un temps (TT_{s1s2} dans la Figure IV.8).

Bien que le bloc « Process » dispose d'une file d'attente intégrée, le modèle développé ne l'utilisera pas. En effet, dans le but de reproduire le comportement réel dans le transport ferroviaire, si un train rattrape son prédécesseur (i.e. il se trouve à une distance limite de ce dernier), un mécanisme d'ajustement de la distance est activé. Dans notre cas, il s'agit d'augmenter le temps de parcours « $TT_{s,s+1}$ » de ce train, en utilisant le bloc « VBA » (les tests de distance sont réalisés dans VBA).

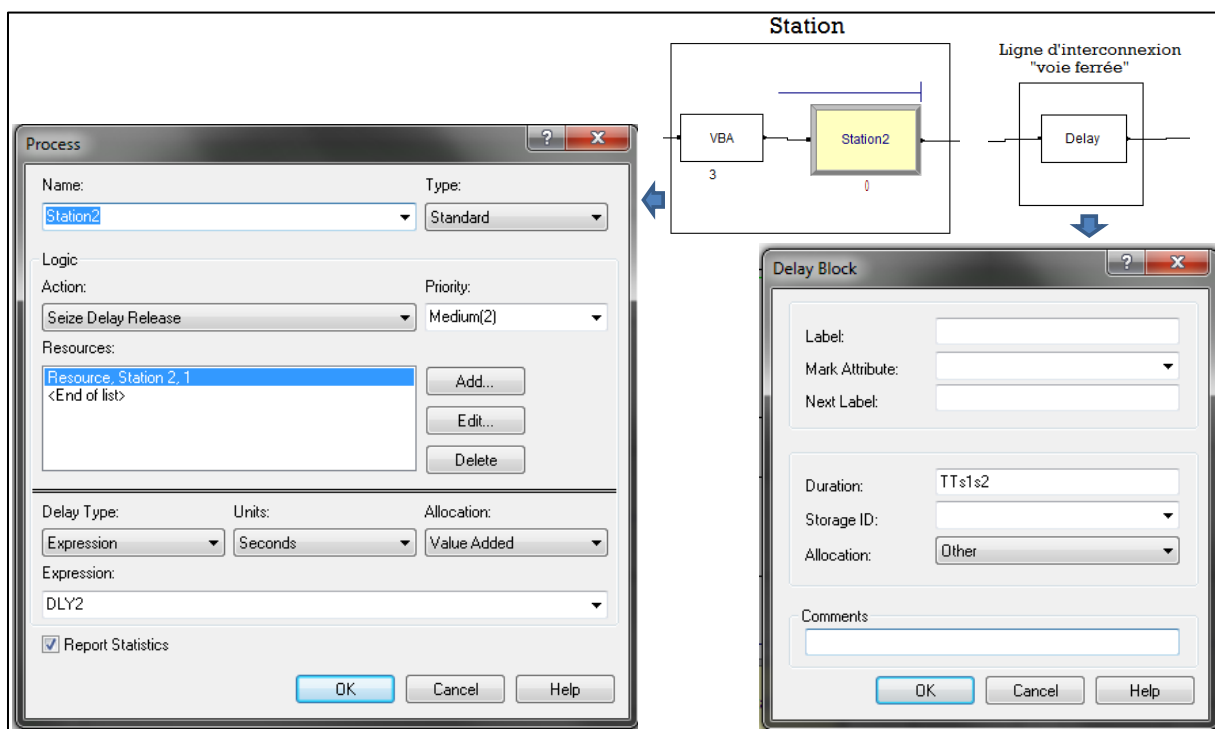


Figure IV.8 : Modélisation des stations et des voies ferrées

3.4. Implémentation des processus décisionnels sur ARENA

Il s'agit de décrire le processus qui va permettre l'affectation des commandes aux trains. Dans un premier temps, nous avons développé quatre heuristiques, dont trois qui sont basées sur des règles de priorité, puis une quatrième plus élaborée, qui est basée sur la décomposition du FRTSP en plusieurs sous problèmes mono-train. Ces quatre heuristiques ont été adaptées pour prendre en compte toutes les contraintes techniques et organisationnelles du FRTSP.

3.4.1. *Heuristiques basées sur les règles de priorité*

Les heuristiques basées sur les règles de priorité sont très pratiques et très appréciées dans l'environnement industriel, notamment pour leur facilité de compréhension. En effet, elles sont simples à mettre en œuvre et dans certains cas, fournissent de bonnes solutions. L'avantage majeur de ces dernières est leur capacité à produire des solutions très rapidement, ce qui est crucial dans un environnement soumis à de fréquents changements et perturbations.

Ces trois heuristiques, nous ont permis de valider le schéma organisationnel proposé, avec des acteurs du transport ferroviaire, ainsi que d'avoir une référence sur les conséquences d'une potentielle mise en exploitation.

Bien que simple à mettre en œuvre, il est indispensable que chaque heuristique, considère toutes les contraintes d'exploitation. Ces contraintes consistent en :

- La limitation des temps d'attente de chaque train, dans chaque station.
- Les capacités des trains.
- Les dates de disponibilité des commandes.
- Le temps de parcours entre les stations.

Ces heuristiques sont implémentées en utilisant le langage VBA. Ainsi, lors du passage de chaque train à chaque station (représentée par un bloc VBA suivi d'un bloc Process dans la Figure IV.8), et selon l'heuristique appliquée, certaines commandes sont affectées au train. Cette affectation s'effectue suivant la règle de priorité et en tenant compte des différentes contraintes. Plus précisément, les calculs pour la sélection des commandes à affecter à un train, sont effectués lors de son passage par le bloc « VBA ». L'affectation résultante, se traduit en un temps d'arrêt nécessaire au chargement des commandes et l'occupation d'un certain espace, à l'intérieur du train. Ces trois heuristiques se présentent comme suit :

- **1^{ère} heuristique : basée sur une règle de priorité de type « FIFO »**

Dans ce cas, le principe est de hiérarchiser l'ordre d'affectation des commandes aux trains, selon leur date de disponibilité. Toutefois, si la possibilité d'affectation d'une commande, suivant son ordre hiérarchique, est impossible (en raison de : manque d'espace, manque de temps pour son chargement en totalité, voire, de son déchargement à sa station d'arrivée), l'affectation de la commande suivante sur la liste est évaluée. Ainsi, l'évaluation des affectations possibles se poursuit jusqu'à saturation de la capacité du train, ou l'épuisement de son temps d'arrêt dans cette station.

- **2^{ème} heuristique : priorité aux commandes de plus grande taille**

Ayant identifié l'espace dans les stations, comme étant l'une des ressources critiques, du système de transport étudié, l'idée de transporter les commandes de plus grandes

tailles, devrait permettre la libération rapide de l'espace dans les stations, ainsi que l'amélioration du taux d'utilisation de l'espace.

Le principe de cette règle est de hiérarchiser l'ordre d'affectation des commandes aux trains, en ordre décroissant, selon le nombre de colis les composant. Toutefois, comme pour le FIFO, s'il est impossible d'affecter la commande prioritaire, l'affectation des commandes suivantes est évaluée.

- **3^{ème} heuristique : priorité aux commandes de plus petite taille**

Les capacités des trains et leurs temps d'attente dans les stations étant fortement contraints, l'idée étant de privilégier les commandes de petites tailles. Cette règle s'inspire de la charge la plus faible d'abord, ce qui devrait augmenter la fluidité dans le système. En effet, il y a plus de chances de pouvoir charger les petites commandes, car cela prend moins de place et moins de temps également.

Les commandes ayant le moins de colis sont dans ce cas prioritaires. Comme pour les deux règles précédentes, un processus itératif permet de tester les candidats à l'affectation dans le cas de l'échec de l'affectation de la commande prioritaire. Le processus se termine une fois le train saturé, ou le temps d'attente du train dans la station épuisé.

A noter que pour chacune de ces trois heuristiques, une règle de priorité supplémentaire s'ajoute aux spécificités de chacune d'entre elles. Il s'agit de la priorité relative à l'ordre des stations desservies par les trains. En effet, chaque heuristique est appliquée au niveau de chaque station, ce qui octroie une priorité aux commandes, selon leur station de départ.

3.4.2. **4^{ème} heuristique : basée sur l'optimisation du problème d'un seul train**

Cette heuristique procède par décomposition et résolution exacte des sous-problèmes, tel que chaque sous problème est relatif au chargement optimal d'un seul train. Ceci, à travers un processus d'évaluation de différentes possibilités d'affectation des commandes à chaque train, pour maximiser le nombre de commandes pris en charge par le train correspondant. La résolution de chaque sous-problème est basée sur un algorithme de type séparation et évaluation. L'intérêt de cette décomposition est lié directement à la réduction de la complexité du problème initial en raison de la considération d'un sous ensemble des commandes disponibles, lors du passage du train en question. Ceci réduit sensiblement, le nombre de possibilités à explorer. En effet, comme les dates de disponibilité des commandes, ainsi que leur taille, sont disponibles à l'avance, cela permet de construire les sous-ensembles des commandes disponibles pour chaque train au niveau de chaque station. La solution optimale de chaque sous-problème permet de construire une solution approchée du problème.

Pour illustrer l'algorithme de résolution de cette 4^{ème} heuristique, nous proposons l'exemple, dont l'arbre des possibilités est schématisé par la Figure IV.9. Nous considérons le train t_1 , pour lequel trois commandes seront disponibles lors de son passage par la ligne ferroviaire (j_1, j_2 et j_3). Chaque nœud de l'arbre correspond à une instanciation de la variable binaire de décision d'affectation de la commande. Le problème mono-train revient à déterminer les commandes à transporter, en maximisant leur nombre, tel que les contraintes d'espace et de temps sont respectées. Lorsqu'il y a plusieurs solutions équivalentes, celle qui minimise le temps d'attente des commandes, avant leur chargement dans le train, est privilégiée. Dans le

cas où il y a encore, plusieurs solutions équivalentes, la première est retenue. Concernant la construction du schéma de branchement, les étapes décrites ci-dessous permettent de le synthétiser :

- L'ensemble des commandes potentiellement transportables par le train sont sélectionnées.
- L'instanciation des variables permettant d'affecter les commandes se fait par ordre croissant de leur stations de départ (ceci permet de déterminer le temps d'arrivée exact du train au niveau de chaque station).
- La construction de l'arbre est de type *deep first*, pour privilégier l'évaluation de la prise en charge de l'ensemble des commandes d'abord.
- Au niveau de chaque nœud de l'arbre il faut :
 - Les contraintes de respect de l'espace et du temps disponible, qui vont conditionner l'instanciation de la variable correspondante.
 - Des mises à jour concernant l'espace disponible dans le train et le temps d'arrêt à la station courante.

Sur la Figure IV.9, nous illustrons un exemple d'un problème mono-train en présence de trois commandes à transporter :

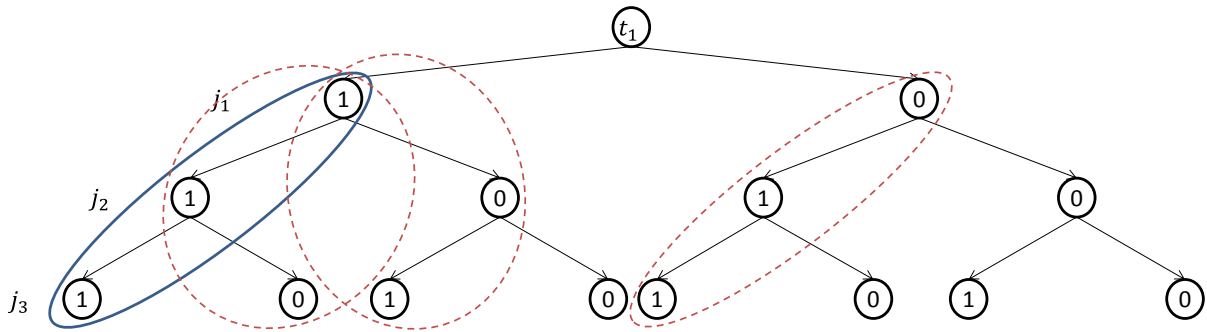


Figure IV.9 : Illustration de la construction d'une solution avec la 4^{ème} heuristique

- Le cas encerclé en bleu (trait plein) : cela correspond à la faisabilité du chargement de toutes les commandes disponibles. Dans le cas contraire, on retrouve :
- Les cas encerclés en rouge (trait pointillé) : après l'échec de la prise en charge des trois commandes, les possibilités testées sont celles considérant uniquement deux commandes. Il y a donc trois cas possibles car il faut choisir deux éléments parmi 3.

Le principe de fonctionnement de la 4^{ème} heuristique est donné par l'Algorithme IV.1. Nous introduisons de nouveaux paramètres comme suit :

- La liste des commandes pouvant être transportées par le train t est notée J_t .
- Date d'arrivée du train t à dep_j est notée : R_j .
- La borne supérieure de la date d'arrivée du train t à dep_j , correspond à un temps d'attente maximum du train t dans toutes les stations qui précèdent dep_j : $R_j^{max} = l_t + \sum_{s=1}^{dep_j-1} tt_{s,s+1} + (dep_j - 1) * wait_{max}$
- La borne supérieure courante de la fonction objectif est notée : F_{best} .

- La valeur de la fonction objectif en cours est notée : F_{int} .
- Chaque nœud de l'arbre correspond à l'instanciation d'une variable de décision, notée : $x_{jt} \in \{0,1\}$. L'évaluation étant effectuée par train, la valeur de l'indice t sera fixe tout au long de l'exécution de l'algorithme. C'est l'affectation des différentes commandes j -avec $j \in J_t$ - qui est évaluée à travers l'arbre de recherche.

Algorithme IV.1 : 4^{ème} heuristique basée sur l'optimisation du chargement par train

1. Initialisation des paramètres (relatifs au train t : l_t, cap_t)
 2. Construction de J_t :
 - $r_j \leq R_j^{max}$
 - j n'a pas été affectée à un autre train
 3. $F_{best} \leftarrow M$ (un grand nombre positif)
 4. $F_{int} \leftarrow 0$
 5. Pour chaque $j \in J_t$ (évaluation des nœuds de l'arbre)
 6. Si j peut être transportée par t en effectuant les 3 tests {
 - $R_j \geq r_j$
 - $cap_t - \sum_{j' \text{ (à l'intérieur du train)}} Q_{j'} \geq Q_j$
 - $time * Q_j + \sum_{j' \text{ (commandes avec } dep_{j'} = dep_j \text{ et affectées à } t)} time * Q_{j'} + \sum_{j'' \text{ (commandes avec } arr_{j''} = dep_j \text{ et affectées à } t)} time * Q_{j''} \leq wait_{max}$
 } alors
 7. Affecter j à t ($x_{jt} = 1$)
 8. $F_{int} \leftarrow F_{int}$ calculée au nœud précédent + $[R_j - r_j]$
 9. Sinon
 10. | j n'est pas affectée à t : $x_{jt} = 0$ (couper la branche correspondant à $x_{jt} = 1$)
 11. Fin Si
 12. Si $F_{int} > F_{best}$ alors
 13. | Couper la branche actuelle et aller à la branche suivante
 14. Fin Si
 15. Si (toutes les commandes de J_t ont été évaluées) et ($F_{int} < F_{best}$) alors
 16. | $F_{best} \leftarrow F_{int}$
 17. Fin Si
 18. Si (toutes les commandes de J_t ont été évaluées) et (il reste des branches à explorer) et ($\exists$ une branche avec un nombre de commandes pouvant être affectée à $t \geq$ nombre de commandes affectées en considérant la meilleure solution actuelle) alors
 - 19. | Retour arrière jusqu'à la dernière commande affectée à t (dernier $x_{jt} = 1$)
 - 20. | Ne pas affecter cette commande à t (mettre $x_{jt} = 0$).
 21. Fin Si
 22. Prochaine commande
 23. Considérer l'affectation correspondant à F_{best}
-

3.5. Modèle conceptuel du modèle de simulation

Ce modèle conceptuel est composé de deux parties comme le montre la Figure IV.10.

- La première partie représente le diagramme principal (à gauche de la Figure IV.10).
- La seconde partie représente les diagrammes alternatifs (à droite de la Figure IV.10), à substituer dans le diagramme principal, en fonction de l'algorithme décisionnel implémenté :
 - Les trois sous-processus en haut à droite de la figure, sont utilisés pour trier les commandes, en fonction de la règle de priorité choisie.
 - Quant au quatrième sous-processus, il est utilisé pour récupérer la solution de l'exécution de la 4^{ème} heuristique.
 - Enfin, le diagramme encadré n°2 est dédié à la 4^{ème} heuristique et, il doit remplacer dans le diagramme principal, la partie encadrée n°1, qui est dédiée au trois autres heuristiques.

Ainsi, le processus global de transport de marchandises par les trains, à travers la ligne ferroviaire, se résume comme suit :

- Le train arrive à la station 1 à partir du dépôt, à l'instant t_t .
- Le train circule tout au long de la ligne, en marquant un arrêt à chaque station. Lors de chaque arrêt, plusieurs tests sont effectués comme suit :
 - Pour chaque commande à l'intérieur du train, si la station actuelle correspond à sa station d'arrivée, alors :
 - ✓ Décharger la commande correspondante.
 - ✓ Mettre à jour le temps d'attente du train dans la station actuelle.
 - ✓ Mettre à jour la capacité actuelle du train en nombre de colis standards.
 - Pour le processus de chargement, cela dépend de l'algorithme décisionnel sélectionné.
 - Pour les trois heuristiques basées sur les règles de priorité, dans chaque station, les commandes disponibles sont ordonnées selon la règle en question. Ainsi, l'évaluation de l'affectation des commandes au train, est effectuée suivant l'ordre de priorité. L'évaluation porte sur :
 - ✓ La capacité disponible à l'intérieur du train en nombre de colis standards.
 - ✓ Le temps d'attente disponible dans la station. Pour rappel, dans chaque station, le train commence par décharger les commandes dont c'est la station d'arrivée (ce qui va nécessiter un certain temps d'attente). Puis, si le temps est suffisant, d'autres commandes seront chargées. A chaque commande chargée, le temps d'attente disponible se réduit.
 - Si la commande peut être transportée par ce train, alors :
 - ✓ Charger la commande.
 - ✓ Mettre à jour le temps d'attente du train dans la station actuelle.
 - ✓ Mettre à jour la capacité actuelle du train.
 - Pour la 4^{ème} heuristique, la détermination des commandes à transporter par le train dans chaque station, est effectuée lors de la mise en circulation de ce