

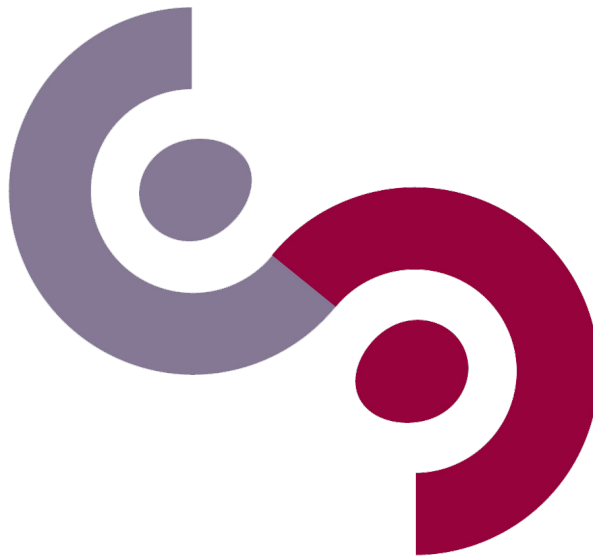
Rapport du Projet ST7 - Groupe 3

Hydrogen Energy

GH2E Supply Chain Simulation

BEN BRAHIM Saâdallah
COURTY Lola
MEUNIER Maxime
PINHEIRO TERASHIMA Rafael Seigi
RENE Paul

31 mars 2022



Gif-sur-Yvette
CentraleSupélec

Table des matières

1	Contexte de l'étude	3
2	Le modèle conceptuel	3
3	Présentation de la simulation	5
3.1	Paramètres temporels et variables étudiées	5
3.2	Vue d'ensemble	5
3.3	Choix des distributions	6
3.4	Consommation de l'hydrogène	6
3.5	Gestion des chauffeurs	7
3.6	Gestion des trailers	8
3.7	Fonction de demande	8
4	Exploitation du modèle	10
4.1	Détermination du nombre de runs nécessaires	10
4.2	Détermination de la période de warm-up	10
4.3	Sensibilité	11
5	Résultats et conclusions	13
6	Annexe	16

1 Contexte de l'étude

Dans un contexte de transition énergétique, le dihydrogène joue un rôle très important, on estime qu'il représentera 18% de la demande d'énergie totale d'ici 2050. Parmi les différentes applications énergétiques du H_2 , l'utilisation dans l'industrie de mobilité est une part considérable prête à être développée. Donc, des centres d'approvisionnement en hydrogène sont nécessaires pour répondre à cette nouvelle demande de véhicules, de bus, de trains ou même d'avions.

Dans ce cas d'étude, Air Liquide, un grand producteur d'hydrogène, étudie l'implémentation d'un nouveau centre de remplissage et distribution d'hydrogène gazeux pour approvisionner des stations hydrogène pour la mobilité par bus. Pour prendre la meilleure décision, une modélisation des flux (trailers d'hydrogène gazeux transportant 700kg) est nécessaire pour visualiser le système et évaluer quelles sont les valeurs nécessaires pour permettre à ce centre de remplissage (FC) d'approvisionner tous les clients.

2 Le modèle conceptuel

Le client (Air Liquide) souhaite créer un nouveau centre de remplissage d'hydrogène gazeux pour 4 HRS (*Hydrogen Refuelling Station*). Il s'agit de déterminer le nombre de trailers et de places de parking nécessaires pour les trailers vides et pleins, et le temps passé par chaque trailer dans le FC en moyenne. Ainsi, les objectifs du client sont de fournir à temps tous les HRS, minimiser le temps que les trailers passent dans le FC et, en outre, le nombre minimum de trailers et de places de parking pour les trailers vides et pleins en garantissant que la demande soit toujours satisfaite.

Selon les objectifs du client et la problématique, nous devons modéliser ce système. Pour commencer, nous définissons les contenus du système. Il est nécessaire d'inclure : les deux parkings ; les trois rampes de remplissage ; une personne pour placer et retirer les trailers des rampes ; les chauffeurs ; les quatre clients et le trajet pour chacun.

En ce qui concerne les entrées du système, celles-ci sont :

- Nombre total de trailers dans le système (divisés entre trailers vides et pleins)
- Nombre de places de parking pour les trailers vides
- Nombre de places de parking pour les trailers pleins

Ces trois paramètres d'entrée sont les variables que le client veut déterminer. Il faut également penser aux sorties du système qui seront utiles pour évaluer la performance du modèle. Les sorties attendues de ce système sont :

- Taux d'utilisation de chaque client (pour savoir si les livraisons sont effectuées à temps)
- Temps moyen passé par les trailers dans le FC
- Quantité d'hydrogène restante lors d'une nouvelle livraison. Cette mesure permet de savoir avec combien d'avance les livraisons sont arrivées. Trop d'hydrogène restant indique que les commandes sont faites en excès dans le modèle.

Suite aux informations fournies, le flux des trailers peut être schématisé de la manière suivante :

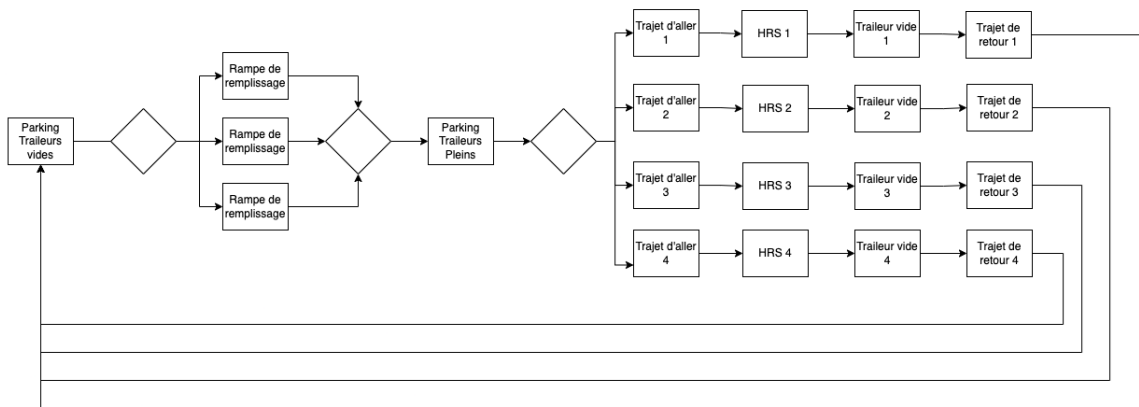


FIGURE 1 – Schéma du flux de trailers

Cependant, si l'on considère également les chauffeurs dans le flux de trailers, puisqu'ils font partie d'une grande partie des flux, le schéma devient plus complexe et peut être représenté comme suit :

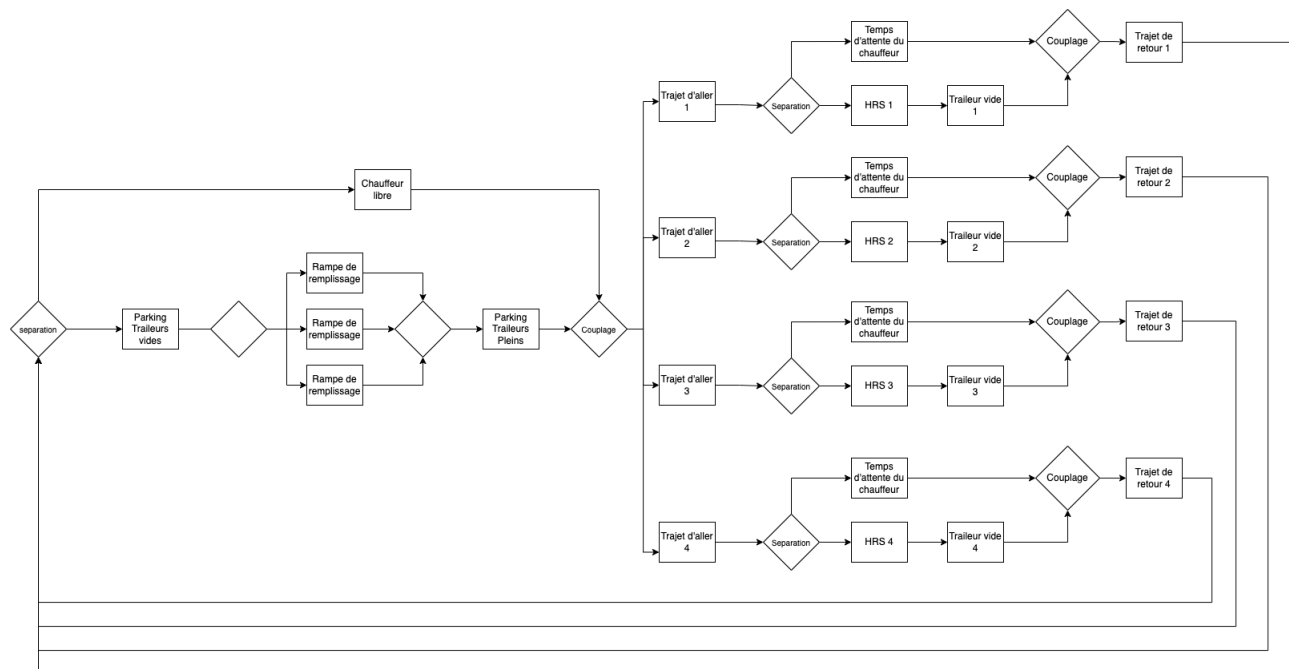


FIGURE 2 – Schéma du flux complet

3 Présentation de la simulation

3.1 Paramètres temporels et variables étudiées

Afin de pouvoir agir avec précision, et pour éviter toute erreur logique, nous avons opté pour une simulation utilisant la minute comme unité de temps, et une simulation sur des journées entières, bien qu'il ne se passe rien de minuit à quatre heures. L'objectif d'exploitation de cette simulation est de déterminer le nombre optimal de places de parking en amont et en aval des rampes du Filling Center, et une boîte de dialogue nous propose donc de modifier directement ces deux valeurs au début de chaque run.

3.2 Vue d'ensemble

Voici ce à quoi ressemble la simulation sur Simul8 :

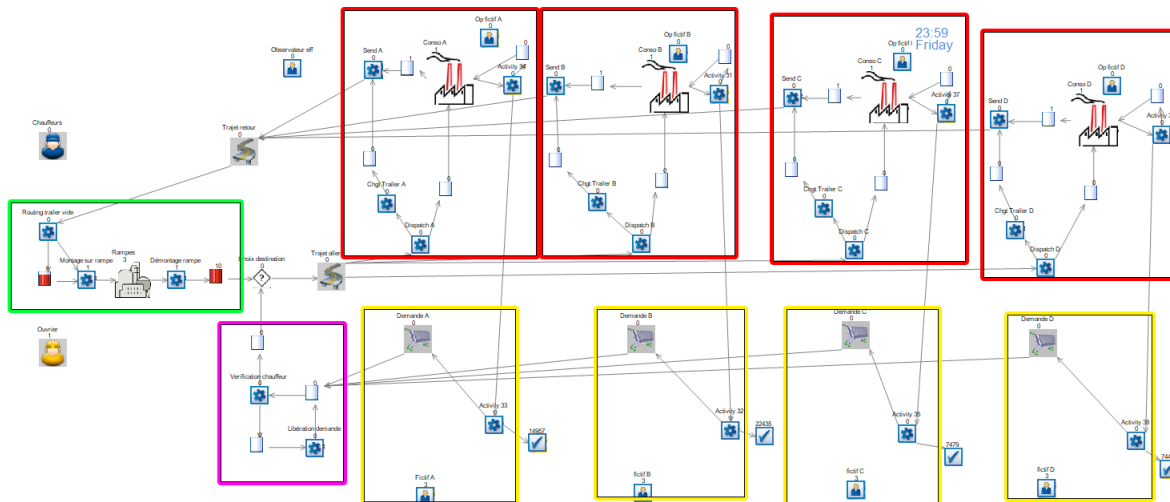


FIGURE 3 – Modèle Simul8

Nous avons découpé cette figure en différentes parties :

- les HRS (en rouge)
- la partie demande (en jaune) de chaque HRS. Son but est de nous permettre de paramétrer l'envoi d'hydrogène supplémentaire afin de ravitailler les HRS. (cf section "fonction de demande")
- la vérification des shifts des chauffeurs (en fuschia). Son but est de vérifier qu'un chauffeur ne va pas (ou peu) déborder sur son shift en effectuant une livraison. (cf section "gestion des chauffeurs")
- le Filling Center (en vert). Les trailers y arrivent et attendent d'être remplis et d'avoir une livraison à faire.

Le reste correspond à la ressource en chauffeurs et au trajet des trailers jusqu'aux différents HRS.

3.3 Choix des distributions

Temps de trajet

Pour créer les distributions du modèle, nous avons simplement réfléchi au cas de figure générique. Sur un temps de trajet annoncé, on peut souvent aller un peu plus vite ou lentement, jamais beaucoup plus vite, et rarement beaucoup plus lentement (en cas d’embouteillages, voire d’accident). Cela correspond à une *long-tailed distribution*, la plus simple étant la distribution log-normale. On choisit ainsi les paramètres suivants :

- Durée moyenne visée : $T=D/V$, donc pour HRS 1, la durée de référence est 100km/50kmh = 2h. On a donc $D_{ref} = 120min$
- On considère qu’on pourra au maximum gagner 10% du temps de trajet de référence. La distribution log-normale commençant à 0, cela correspond à $D_{ref} \cdot 0.9$, soit $offset = 108min$ pour HRS 1
- La moyenne devant être la durée de référence, on a donc $average = D_{ref} \cdot 0.1$, 12 minutes pour HRS 1
- Enfin, on évalue empiriquement l’écart-type pour chaque temps de trajet. Plus le trajet est long, plus sa durée est variable et plus le risque d’être fortement ralenti est grand. Les écarts-types choisis pour HRS 1-4 sont donc de 7, 10, 3.5 et 1.5

Temps de consommation

Comme expliqué ci-après, nous avons opté pour une modélisation kilogramme par kilogramme de la consommation sous forme Gaussienne, les procédés industriels étant souvent précisément calibrés. Cela correspond aux calculs suivants :

- $Durée\ de\ consommation\ d'un\ trailer = 700kg \div \frac{Consommation\ Journalière}{20\ heures}$. Cela correspond à 14 heures pour HRS1, soit 840 minutes.
- La durée de consommation d’un kilogramme est donc celle-ci divisée par 700, 1.2 minute pour HRS1.
- Les écarts-types sont encore choisis arbitrairement, cependant, ils sont proportionnellement plus petits plus la consommation est importante, car un processus à plus grande échelle est souvent mieux contrôlé et stabilisé qu’un petit. Ainsi, pour HRS1-4, on choisit des écarts-types de 0.17, 0.15, 0.22, 0.22.

3.4 Consommation de l’hydrogène

La modélisation de la consommation en hydrogène chez les différents clients s’appuie sur un jeton, qui représente un trailer, portant un label "*conso*" de valeur initiale 700, pour les 700kg d’hydrogène. Dans l’activité symbolisant les HRS, ce label va être décrémenté de 1 en 1 selon le volume consommé quotidiennement par le HRS (converti ici en temps de consommation par kilogramme d’hydrogène). Sur Simul8, cela se traduit par des va-et-vient entre l’activité et une queue. Une fois la valeur du label inférieure à 1, le trailer est vide et est envoyé dans une autre queue, représentant une place de parking vide chez le client.

Ce choix repose avant tout sur le besoin d'avoir accès facilement à l'hydrogène restant chez chaque client pour déterminer ensuite quand les réapprovisionner au mieux.

Par ailleurs, nous avons choisi d'utiliser la fonction *"locked"* dans le *"routing in"* de l'activité représentant le client. Celle-ci permet de forcer une activité à prendre des jetons d'une voie en particulier, indiquée à l'aide de Visual Logic. Ici cela nous permet de bien continuer à vider le trailer en cours d'utilisation, malgré l'arrivée du nouveau. En effet, puisque nous avons choisi de modéliser la consommation en hydrogène par un jeton faisant des va-et-vient, il est possible que l'activité choisisse le mauvais jeton. Dans ce cas, *"locked"* permet de régler le problème. Toutefois, entre plusieurs runs, l'activité se souvient de la dernière route qui a été bloquée, ce qui peut être gênant lors de l'initialisation. À la fin de chaque run, nous avons donc écrit quelques lignes sur Visual Logic (figure 15) pour régler le *"routing in"* de ladite activité sur l'option *"priority"*. Attention, il faut donc bien terminer et non reset une run avant d'en lancer une autre pour que la simulation marche !

3.5 Gestion des chauffeurs

Pour éviter que les chauffeurs fassent des heures supplémentaires, une vérification utilisant Visual Logic a été implémentée. Pour chaque demande reçue, si un chauffeur est disponible, un calcul est effectué pour déterminer s'il peut aller livrer un trailer au client dans le temps imparti de son shift, soit comptabiliser l'aller, le retour et le temps d'attente chez le client (voir figure 13). Si c'est possible la demande est traitée, et le chauffeur part. Sinon, la demande est rejetée et ne sera retraitée qu'au début du prochain shift. L'ensemble de ce processus est fictif : les activités ont un temps fixé à 0, et même si un chauffeur est mobilisé un bref instant en tant que ressource lors du calcul, il est relâché si la demande est rejetée.

Avec la variabilité du temps de trajet, il est tout de même possible que des chauffeurs se retrouvent à faire des heures supplémentaires.

De plus, un chauffeur doit repartir avec un trailer. Il faut donc, s'il n'y a pas déjà un trailer vide disponible, que le client libère celui en cours d'utilisation, même s'il y reste de l'hydrogène, et se mette à consommer l'hydrogène du trailer qui vient de lui être livré. Cette manipulation est implémentée sur Visual Logic (voir figure 16).

Dans ce dernier cas, le trailer en question retournera dans le Filling Center encore partiellement rempli. Dans un premier temps, nous avons considéré qu'on ne recyclait pas l'hydrogène et que par conséquent le trailer était entièrement rempli à chaque passage au Filling Center. Cette solution avait l'avantage d'être simple : le temps dans chaque rampe était constant. Nous avons ensuite opté pour une approche plus logique et corroborée par Air Liquide, à savoir que l'hydrogène restant était réutilisé directement. Cela implique que le temps de remplissage devient alors fonction de la quantité d'hydrogène restant. Un peu de Visual Logic dans le bloc gérant les rampes et le tour était joué (voir figure 17) !

Le détail de toutes les fonctions réalisées sur Visual Logic est disponible en annexe.

3.6 Gestion des trailers

Au niveau des trailers, les contraintes étaient de n'avoir qu'une place par trailer entrant, et une place par trailer sortant, dans chacun des sites de production, alors que l'objectif de l'étude était de déterminer leur nombre optimal au Filling Center. Nous avons opté pour qu'une seule de ces deux places soit utilisée à tout instant lorsque possible, cependant la haute consommation du Site 2 fait qu'on doit en permanence avoir un trailer présent en plus, afin d'éviter qu'un conducteur arrivé pour le réapprovisionnement ne doive partir avec un trailer loin d'avoir été entièrement consommé.

3.7 Fonction de demande

Pour modéliser la demande, une première version a été conçue en tenant compte uniquement du taux de consommation de chaque client et la distance entre le client et le FC. Pour cela, chaque fois qu'un camion arrive chez le client avec un trailer plein, il démarre une activité qui a une durée fixe exacte qui correspond au temps qu'il faut attendre pour envoyer un nouveau trailer plein pour qu'il arrive au bon moment. La durée de cette activité est calculée de la façon suivante :

$$T_0 = \frac{700 - \frac{D}{V} \cdot C}{C} = \frac{700}{C} - \frac{D}{V}$$

où D = Distance du client, V = Vitesse moyenne du camion et C = taux de Consommation horaire du client.

Cette méthode permet de modéliser de manière simple la fonction de demande de chaque client. Toutefois, il ne tient pas compte des shifts des chauffeurs ni des heures de fonctionnement des sites du client. Ainsi, il se produira des retards dans les livraisons, ce qui est problématique. Une façon de contourner cette situation est de mettre un facteur de sécurité ($0 < \sigma < 1$) de sorte que le temps de l'activité en attente soit inférieur à ce qui est idéalement prévu afin que le système puisse indirectement corriger les problèmes de retard. Le temps de chaque activité serait donc $T = \sigma T_0$.

De cette façon, une calibration de σ peut enlever les retards. Cependant, ce n'est pas encore la méthode la plus idéale, car les chauffeurs auront des surcharges inutiles et les camions seront livrés sans que le client ait consommé tout l'hydrogène. Donc, un autre modèle de la demande, plus complexe, est nécessaire pour optimiser les livraisons.

Nous avons donc fait une deuxième fonction de demande, fonctionnant cette fois à flux tendu. Celle-ci s'appuie sur des seuils variables pour modéliser la demande en hydrogène des différents clients. En effet, en plus de devoir prendre en compte le temps de trajet et la consommation journalière, il est important de considérer si la demande pourra aboutir lors de ce shift, ou si au contraire elle ne sera traitée qu'à partir du shift suivant, selon la gestion des chauffeurs explicitée auparavant. Dans ce cas, il faut rajouter dans notre calcul de seuil la prévision de la consommation en hydrogène avant le prochain shift.

Dès lors, nous pouvons identifier quatre cas : demande réalisable pendant le shift de 5h-14h (*cas 1*), demande devant attendre le shift de 14h (*cas 2*), demande réalisable pendant le shift 14h-23h (*cas 3*), demande devant attendre le lendemain (*cas 4*) . Chacun de ces cas est construit selon le même modèle (voir figure 12) :

Variable : Hydrogène restant chez le client + hydrogène dans le trailer en réserve + hydrogène en attente de livraison

Comparée à

Seuil : Consommation horaire moyenne \times [Temps de sécurité + durée moyenne trajet aller (+ temps avant fin du shift *si cas 2 ou 4*) (+ 2 heures *si cas 4*)]

En une fonction, cela donne pour le HRS1, en kilogrammes :

$$\frac{50}{60} * \left(60 + 120 + \left(\left\lfloor \frac{x}{570} \right\rfloor * \max(0 ; (840 - x)) \right) + \left(\left\lfloor \frac{x}{1110} \right\rfloor * (\max(0 ; 1380 - x) + 2) \right) \right)$$

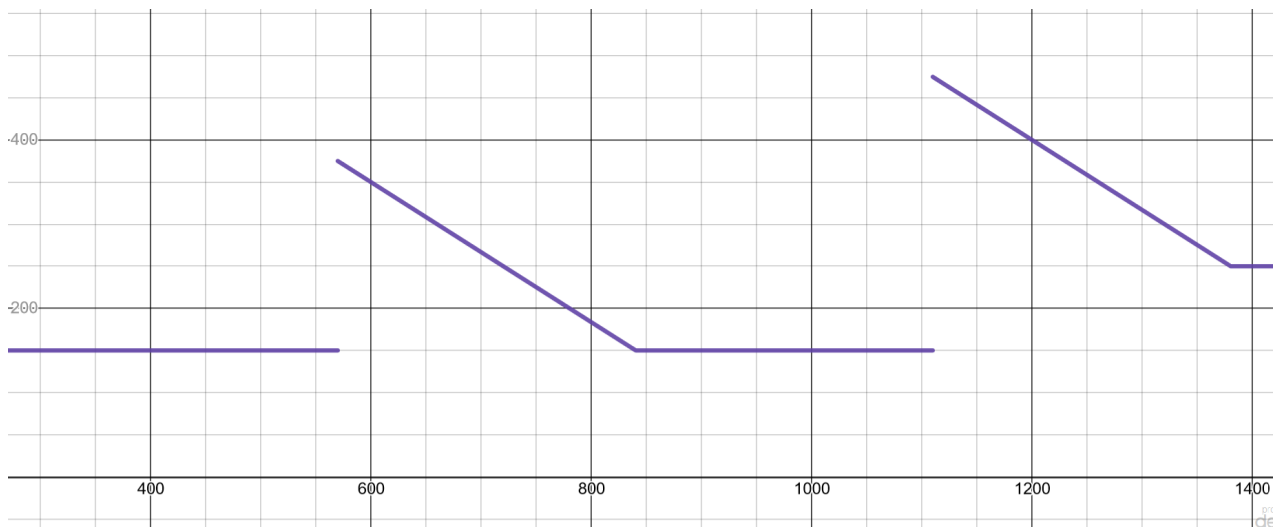


FIGURE 4 – Graphe de la fonction seuil sur les horaires pertinents

Les deux heures ajoutées pour le cas 4 sont dues au fait que les HRS travaillent deux heures de plus que les deux shifts des chauffeurs.

Ainsi, en ajustant le temps de sécurité par client, nous pouvons faire en sorte que les demandes soient faites à flux aussi tendu que nous le souhaitons, le but étant de trouver un compromis entre coût logistique du transport et nombre de trailers en circulation.

4 Exploitation du modèle

4.1 Détermination du nombre de runs nécessaires

Afin de vérifier que nos résultats sont fiables, il a fallu trouver le nombre de runs à partir duquel nous pouvions avoir confiance en leur précision. Nous avons alors listé tous les indicateurs qui nous intéressent. Ce sont notamment les taux d'utilisation des clients et les temps moyens passés aux parkings vides et pleins. Ensuite nous avons utilisé la fonction de Simul8 "Calculate Required Number of Runs" en fixant un taux de précision à 0,95 pour toutes ces variables. Ainsi grâce à cette fonction, Simul8 nous a fourni un nombre de runs égal à 5.

4.2 Détermination de la période de warm-up

Afin d'évacuer la période transitoire initiale du modèle, nous avons utilisé la méthode de l'inspection graphique pour évaluer sa durée. L'indicateur d'intérêt que l'on a choisi est le temps moyen passé au FC qui est composé de 5 éléments : les temps moyens passés dans les parkings vides et pleins, les temps de montage et démontage sur la rampe, et enfin le temps de remplissage. Les temps moyens de montage et démontage sont fixes, il a donc fallu observer uniquement la ressource fictive que nous avons créée pour observer combien de temps chaque traileur passe dans le FC. Nous avons alors lancé 5 runs en recueillant les résultats toutes les 800 minutes grâce à la fonction "Time Interval Results". Ensuite, nous avons utilisé un tableur Excel pour pouvoir tracer le temps moyen passé au FC en fonction du temps de la simulation.

Voici le graphique que nous avons obtenu :

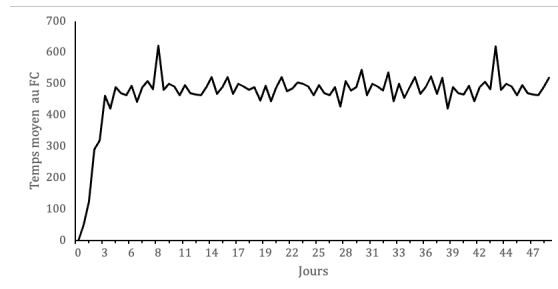
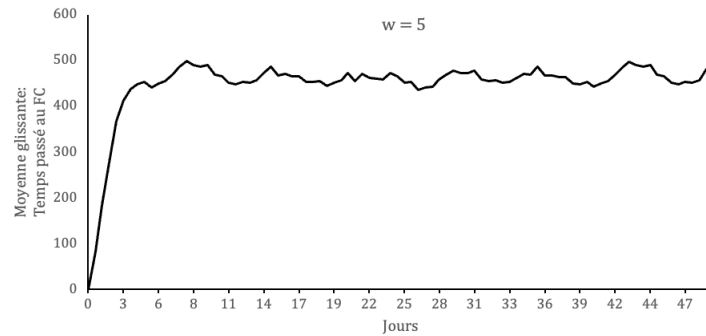


FIGURE 5 – Temps moyen passé dans le FC

Ainsi on peut estimer grâce au graphique que la période de warm-up est d'environ 4000 minutes et qu'après celle-ci, le système se comporte de manière stable. Nous avons donc renseigné cette durée sur Simul8 afin de ne recueillir les résultats uniquement lorsqu'elle se sera écoulée.

Nous avons également utilisé la méthode de Welch pour trouver la période de warm-up et pouvoir comparer avec le résultat trouvé à l'aide de l'inspection graphique. Par conséquent, nous avons tracé la moyenne glissante du temps moyen passé au FC pour $N=2$ en fonction du temps. Voici le graphique que nous avons obtenu :

FIGURE 6 – Temps moyen passé dans le FC lissé avec $N = 2$

On peut alors voir qu'à l'aide cette méthode la période de warm-up est d'environ 5000 minutes, ce qui est un peu plus élevé que la valeur trouvée avec l'inspection graphique. Les résultats trouvés sont cohérents car on sait que la méthode de Welch a tendance à surestimer la période de warm-up vu qu'elle est basée sur une approche cumulative.

4.3 Sensibilité

Places de parkings

Les questionnements des clients se portent notamment sur les places de parkings pour les trailers vides et les trailers pleins. Étroitement liées au nombre de trailers en circulation, il nous a paru intéressant de ne tout d'abord pas borner ces variables pour estimer le maximum qu'elles pouvaient atteindre.

Puis, nous avons borné le nombre de places de parkings des trailers pleins, tout en laissant libre celui des trailers vides. L'étude de sensibilité se porte donc sur cette première variable. En tâtonnant, nous avons constaté qu'en bloquant à 3 le nombre de places de parking des trailers pleins, les performances du système n'étaient pas affectées par rapport à un nombre non borné. En effet, le facteur limitant de cette simulation est en réalité le nombre de chauffeurs : quand quatre demandes doivent être traitées en même temps, seuls trois chauffeurs au maximum pourront partir. Trois trailers simultanément pleins au maximum sont donc parfois requis.

En bloquant le nombre de places de parkings à 1 ou 2, toutefois, nous constatons contre toute attente que cela n'affecte pas les performances du système. En fait, cela est dû à la modélisation : des trailers pleins sont fictivement stockés dans les activités de remplissage au FC et de démontage. Certes, il faut 15 minutes et un opérateur pour que les trailers soient amenés jusqu'au parking, mais c'est un temps très court à l'échelle des temps de trajets vers les HRS.

En pratique, la modélisation implique avec l'activité démontage qui peut "stocker" un trailer, que le nombre de places maximum du parking de trailers pleins est augmenté de 1.

Par ailleurs, le nombre de places de parkings (entre 1 et 3 pour les trailers pleins) ne fait

quasiment pas varier le temps passé dans le FC, à nombre de trailers en circulation fixe.

Ainsi, on peut se limiter à une place de parking pour les trailers pleins, ce qui correspond au maximum à deux places de parking pour les trailers vides.

Nombre de trailers

Afin de lancer le système avec la demande de trailer, nous devons mettre au moins un trailer plein ou vide dans chaque HRS. Cependant, pour réduire le warm-up, nous avons décidé de plutôt mettre un trailer plein en initialisation. Ceci nous bloque au moins 4 trailers dans le système.

Ensuite, nous devons nous occuper du deuxième HRS qui a une forte consommation d'hydrogène et peut avoir entre 2 et 3 livraisons par jour. Dans le cas où il en a besoin de 3, les livraisons vont arriver à un intervalle très court. En effet, comme un trajet aller-retour prend en moyenne 6h30 pour le chauffeur et que les shifts durent 9h, cela veut dire qu'il va y avoir au maximum 2h30 entre 2 arrivées consécutives. Dans le modèle actuel, comme il faut qu'un chauffeur reparte absolument avec un trailer et que par conséquent on fasse retirer un trailer en cours d'utilisation si aucun n'est immédiatement disponible au départ, cela implique qu'on pourrait avoir un trailer consommé pendant uniquement 2h30... Ainsi, nous avons fait le choix de mettre un trailer vide en plus attendant à l'HRS 2.

Enfin, pour pouvoir ravitailler les HRS, nous devons mettre un certain nombre de trailer au filling center attendant à partir ou à être remplis. Après avoir fait des tests sur la simulation, nous avons choisi de mettre 3 trailers initialement (afin de réduire le warm-up) au filling center. En effet, si on en met plus de trailers, les performances du système sont égales au niveau des HRS et moins bonnes côté filling center puisqu'au maximum, on ne peut avoir que 3 chauffeurs en même temps, mais aussi qu'en augmentant le nombre de trailers, ils attendent fatalement plus. D'un autre côté, si on diminue le nombre de trailers, les performances côté HRS diminuent drastiquement (on passe de 98% à 70% de working time).

Finalement, nous avons au total 8 trailers, soit 3 trailers en circulation, deux chez HRS 2 et un pour chacun des autres HRS.

Nous retrouvons avec les trois trailers en circulation, le besoin d'avoir au total trois places de parking au FC en faisant la somme des trailers pleins et vides.

Seuils pour les demandes

Les seuils de demandes sont codés avec un temps de sécurité (voir le paragraphe "fonction de demande"). Il est donc possible de faire varier ce temps selon les clients pour fonctionner plus ou moins à flux tendus, et ainsi maîtriser un peu mieux le gaspillage.

Par défaut, ce temps de sécurité était réglé à une heure pour chaque HRS. Ainsi, les livraisons sont garanties pour 98% du temps. De petites ajustements sont tout de même possible sans compromettre les livraisons : HRS 4 est à 24 minutes de route, son seuil de sécurité peut donc être abaissé à 30 minutes. De plus, puisque nous avons instauré un ordre de priorité des livraisons, les demandes de HRS 2 sont traitées en deuxième et ont donc peu

de chances d'être livrées en retard - si ce n'est pour la variabilité du temps de trajet. Son seuil peut donc également être abaissé.

Bien sûr, trop baisser les seuils de sécurité augmente le risque de livrer en retard un client. Ce compromis est laissé au choix d'Air Liquide. Les valeurs actuelles permettent un taux de livraison à 98%.

Temps de trajet

Avoir un temps de trajet aléatoire change beaucoup le système. En effet, les seuils et les vérifications de shifts de chauffeur font des calculs sur la base d'un temps fixe. C'est pour cela que pour limiter les effets aléatoires, nous avons pris des marges, ce qui est plus proche de la réalité. En effet, si on doit livrer un HRS, on ne peut pas deviner à l'avance le temps que cela va prendre mais on peut prendre une marge pour essayer de limiter les retards.

Au niveau des performances on observe, comme cela était attendu, que l'introduction de la variabilité des temps de trajets diminue légèrement les performances du système, qui reste robuste.

	Taux d'activité d'HRS 1	Taux d'activité d'HRS 2	Taux d'activité d'HRS 3	Taux d'activité d'HRS 4
Nulle	99%	99.5%	99%	99%
Faible	98.8%	99%	98.8%	98.4%
Elevée	98.4%	99%	98.1%	98.3%

FIGURE 7 – Performances observées pour des variabilités de temps de trajets différentes (run d'un an)

5 Résultats et conclusions

En réglant les différents paramètres évoqués précédemment à leur valeurs nominales, nous obtenons les résultats suivants :

Taux d'activité d'HRS 1	Taux d'activité d'HRS 2	Taux d'activité d'HRS 3	Taux d'activité d'HRS 4	Taux d'activité moyen	Temps moyen passé au FC	Hydrogène non utilisé (en tonnes)
98.8%	99%	98.9%	98.1%	98.7%	7h36	80

FIGURE 8 – Performances pour une run d'un an

A noter que 80 tonnes d'hydrogène représentent 8,8% de l'hydrogène mis en jeu dans la simulation.

En particulier, voici le détail des taux de livraisons moyennés sur 5 runs de 3 mois :

	Minimum	Moyenne	Maximum
Taux d'activité d'HRS 1	98.6%	99.1%	99.6%
Taux d'activité d'HRS 2	98.7%	99%	99.3%
Taux d'activité d'HRS 3	98.3%	98.8%	99.2%
Taux d'activité d'HRS 4	98%	98.4%	98.8%
Moyenne	98.6%	98.8%	99.1%

FIGURE 9 – Performances moyennées sur 5 runs de trois mois

Intéressons nous maintenant au "gaspillage" de l'hydrogène. En effet, tel qu'il est conçu, notre modèle arrête la consommation d'un camion si un chauffeur doit repartir, afin que celui-ci ait un véhicule dans lequel repartir. Ceci engendre forcément des pertes d'hydrogènes. Heureusement, cet hydrogène n'est pas jeté et sera juste utilisé une autre fois (quand le camion aura fait le plein). En moyenne, nous avons l'équivalent de près de 115 camions remplis par an qui ne sont pas consommés. Voici leur répartition par HRS :

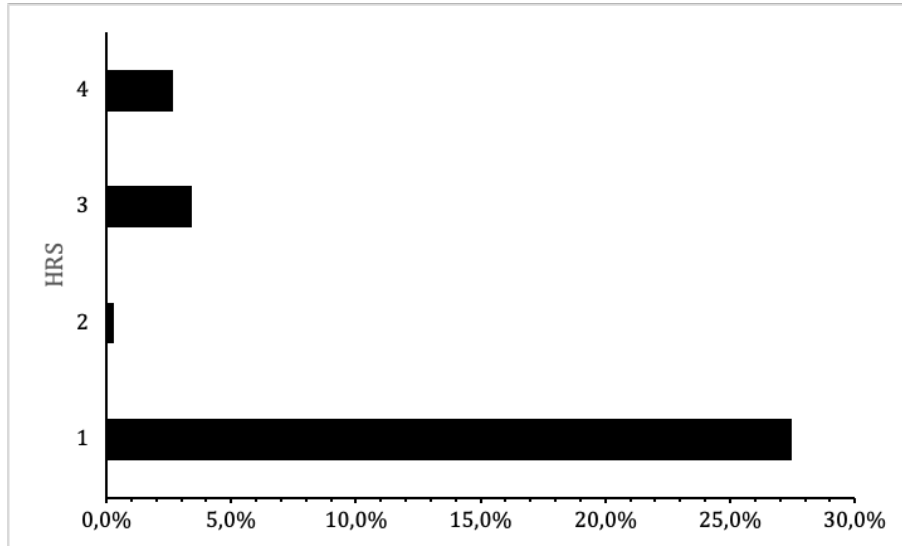


FIGURE 10 – Taux de non consommation des HRS

On voit que le HRS 1 rejette trop d'hydrogène par rapport aux autres. Il faudrait donc concevoir une autre approche pour l'approvisionner puisque abaisser ses marges l'expose au risque de ne plus être assez alimenté.

Une alternative est qu'HRS 1 ait deux trailers au lieu d'un. Ce stockage lui permet d'avoir plus de flexibilité et donc de moins souvent demander une livraison. Dans ce cas de figure, 11 tonnes d'hydrogène sont non utilisées, soit 1,2% de l'hydrogène mis en jeu dans la simulation. Les performances en termes de livraison sont identiques, si ce n'est un peu plus élevées, mais le temps moyen passé par les trailers au FC augmente. Toutefois, cette alternative implique d'avoir 9 trailers au lieu de 8 en circulation. Tous les autres paramètres ont été laissé inchangés. Le choix est une nouvelle fois laissé à Air Liquide.

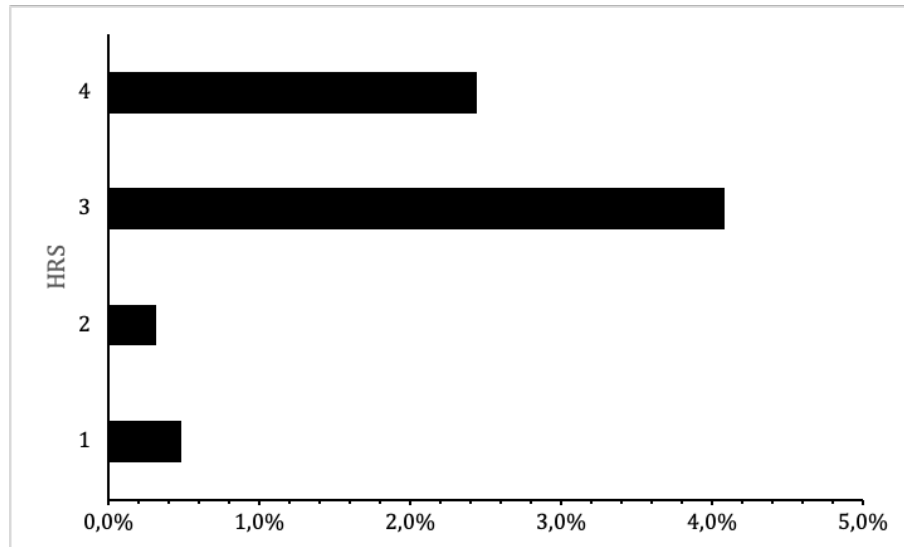


FIGURE 11 – Taux de non consommation des HRS avec 9 trailers

Pour conclure, tous ces réglages ont été faits pour que les HRS aient de l'hydrogène 98% de leur temps de fonctionnement. En ajustant certains paramètres, il est possible pour Air Liquide d'augmenter ou de diminuer cette valeur, selon l'équilibre stock-transport d'hydrogène qu'ils cherchent à atteindre. Pour rappel, la recommandation faite ici implique 8 trailers (ou 9 si un deuxième est rajouté chez HRS 1), dont 3 en circulation, et trois places de parkings au FC réparties entre les trailers vides et pleins. Le nombre de chauffeurs n'était pas variable dans les données fournies par Air Liquide ; un chauffeur supplémentaire ponctuellement lors d'un des shifts permettrait cependant d'améliorer encore plus les performances du système.

6 Annexe

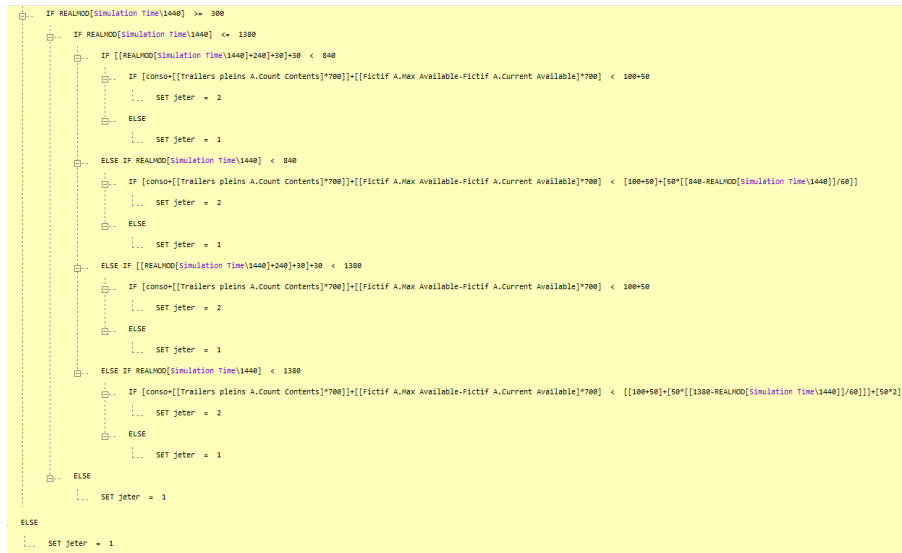


FIGURE 12 – Fonction de demande du client A

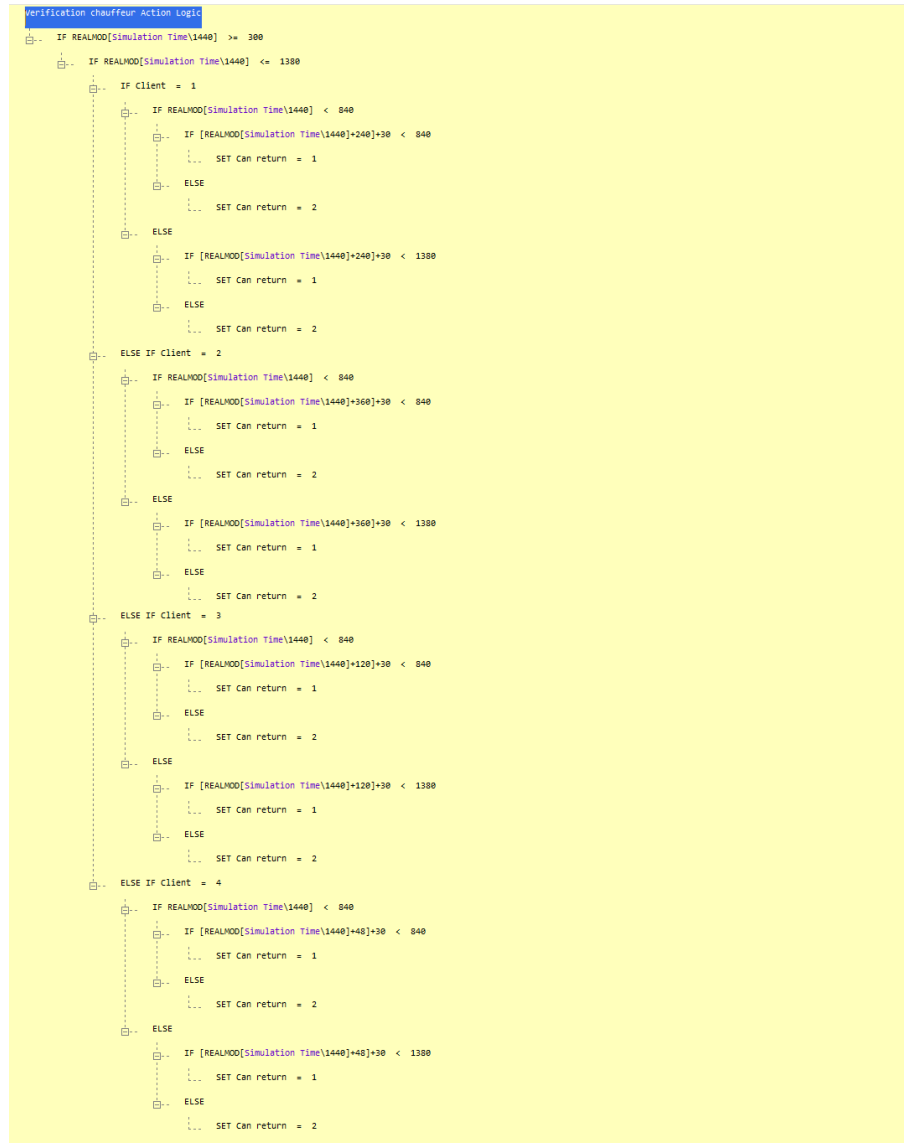


FIGURE 13 – Vérification que les chauffeurs peuvent faire l’aller-retour lors de leur shift

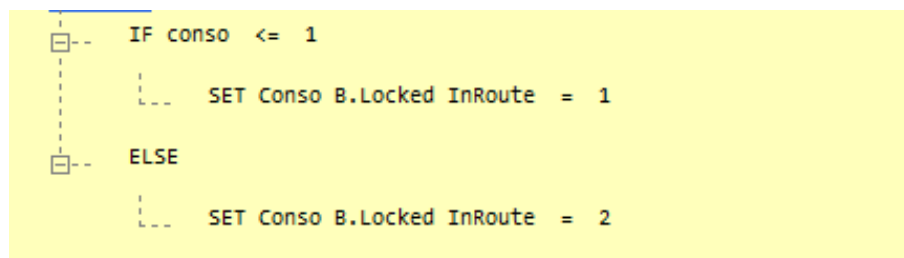


FIGURE 14 – Route bloquée pour la consommation d’hydrogène

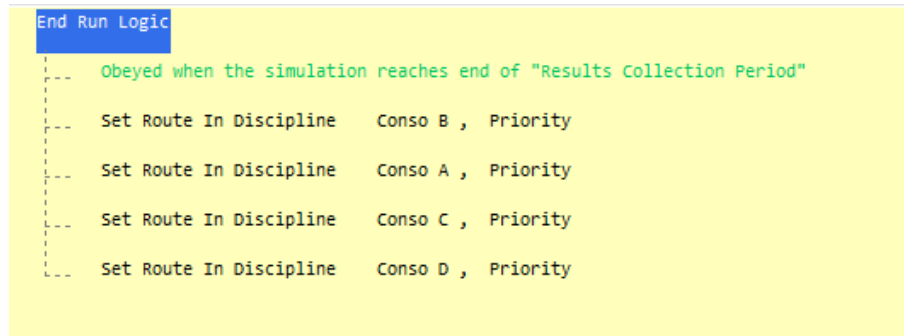


FIGURE 15 – Réinitialisation de certains paramètres à la fin d'un run

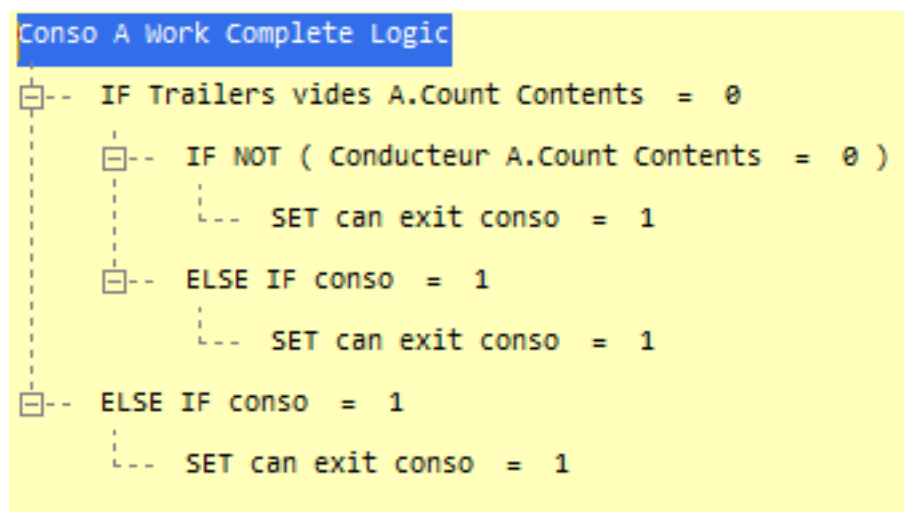


FIGURE 16 – Libération du trailer si nécessaire

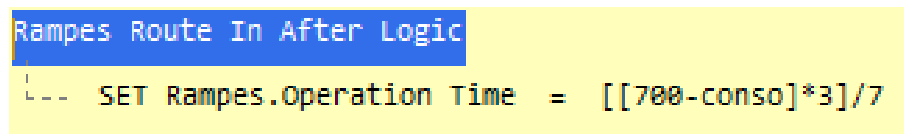


FIGURE 17 – Ajustement du temps d'opération des rampes