



CentraleSupélec

CENTRALESUPÉLEC

OPTIMISATION ET GESTION DE FLUX DE SYSTÈMES
COMPLEXES

ST7 - OPTIMISATION ET GESTION DE FLUX

Projet - Air Liquide

Hydrogen Energy GH2E Supply Chain Simulation

Rédigé par :

Quentin WENGER
Paul ROUBEROL
Idris HOUIR ALAMI
Aymane EL FAHSI
Alexandre LEMAIRE

Remis à :

Guillaume LAME
Xihe GE
Louis NIFFOI
Adam ABDIN

24 mars 2025

Table des matières

1	Contexte	3
2	Modèle conceptuel	3
2.1	Objectifs	3
2.2	Facteurs expérimentaux	3
2.3	Périmètre du modèle	3
2.4	Données du modèle	3
2.5	Ressources du modèle	5
2.6	Hypothèses & simplifications	5
3	Construction du modèle sur <i>Simul8</i>	5
3.1	Présentation du modèle global	5
3.2	Démarche & réflexion	6
3.3	Centre de remplissage	6
3.4	Algorithme de répartition	7
3.5	Hydrogen Refuelling Station (HRS)	9
4	Validation et fiabilité du modèle	11
4.1	Warm-up	11
a.	Conclusion sur la durée du warm-up pour notre modèle	11
4.2	Validation du modèle Simul8	12
4.3	Limites du modèle	12
5	Recommandations	13
5.1	Choix des configurations	13
5.2	Choix des métriques de performance	13
5.3	Résultats et interprétation	14
a.	Résultats	14
b.	Nombre de trailers nécessaires	14
c.	Nombre de places de parking nécessaires au Filling Center	15
5.4	Sans chauffeurs le dimanche	15
a.	Méthodologie	15
b.	Résultats et interprétation	16
6	Conclusion	17

Table des figures

1	Graphes des consommations journalières lissées des 4 clients pour 103 jours . . .	11
2	Résultats - sans chauffeurs le dimanche	16

1 Contexte

Nous présentons dans ce rapport la modélisation d'une chaîne d'approvisionnement pour un centre de remplissage et de distribution d'hydrogène gazeux pour l'entreprise Air Liquide. Ce travail réalisé dans le cadre de la séquence thématique "Optimisation et Gestion des Flux" fait écho au contexte global de transition énergétique et par conséquent du besoin croissant en gaz propre comme l'hydrogène.

En modélisant la chaîne logistique sur le logiciel Simul8 nous avons apporté une réponse aux besoins de l'entreprise : estimation du nombre de trailers utiles pour livrer tous les clients sans interruption de service et le nombre d'emplacements de parking pour ces remorques au centre de remplissage.

Nous mettons à disposition deux versions de fichiers Simul8 : le premier pour un modèle prévoyant des livraisons tous les jours de la semaine, et le second pour un modèle où la consommation s'étend du lundi au dimanche, mais les livraisons sont effectuées seulement du lundi au samedi.

2 Modèle conceptuel

2.1 Objectifs

Les objectifs que notre modèle doit atteindre sont :

- Livrer l'ensemble des 4 HRS pour un fonctionnement à temps complet
- Optimiser le nombre de trailer en circulation nécessaires à la satisfaction des clients
- Déterminer le nombre de places de parking nécessaires pour les trailers, pré et post remplissage au Filling Center.
- Mesurer le temps de passage de chaque trailer dans le Filling Center.
- Déterminer les paramètres à modifier pour compenser une cessation des livraisons le dimanche.

2.2 Facteurs expérimentaux

Afin de répondre au problème initial du client nous allons jouer sur le nombre de trailer et sur le nombre de place de parking du Filling Center. Pour le problème sans dimanche, nous nous permettons aussi d'influer sur le nombre de conducteur disponible.

2.3 Périmètre du modèle

Voici un tableau récapitulatif des paramètres de notre modèle :

2.4 Données du modèle

Les données fournies par le client sont les suivantes :

- La pression ainsi que la pureté de l'hydrogène ne varient pas ;
- La capacité des trailers est de 700 kg d'hydrogène ;
- Le Filling Center fonctionne 24h/24h et est constitué de 3 rampes de remplissage ;

Composant	Inclure/Exclure	Justification
Filling Center	Inclure	Remplissage des trailers
Clients	Inclure	Demande à prendre en compte pour le FC et les chauffeurs
Opérateur FC	Inclure	Lancement des rampes de remplissages non simultanées
Chauffeurs	Inclure	Ressource limitée très demandée, avec shifts
Trajet	Inclure	Durée importante et différente pour chaque client
Trailers	Inclure	Facteur expérimental
Production d'hydrogène	Exclure	Infinie au FC en continue

TABLEAU 1 – Composants du modèle

Composant	Détail	Inclure/Exclure	Commentaire
Filling Center	Places de parking trailer vide	Inclure	Facteur expérimental
	Places de parking trailer plein	Inclure	Facteur expérimental
	Pompes	Inclure	Influence le nombre de trailers
	Temps de remplissage	Inclure	Détermine les trailers pleins
	Déchargement	Inclure	Durée à prendre en compte
Clients	Consommation	Inclure	Critère de satisfaction des clients
	Stockage trailers vides et pleins	Inclure	Satisfaire le client en continu
Opérateur FC	Ressource utilisée	Inclure	Lancement non simultané des rampes
Chauffeurs	Shifts	Inclure	Horaires de travail à prendre en compte
	Taux d'utilisation de la ressource	Inclure	Observer les heures supplémentaires
	Congés	Exclure	Non considérés
Trajet	Temps moyen du trajet	Inclure	Détermination du client à livrer
Trailers	Nombre de trailers	Inclure	Facteur expérimental

TABLEAU 2 – Composants du modèle

- Le temps de remplissage d'un trailer vide est de 5h ;
- Il y a 4 clients HRS ;
- Le fonctionnement des livraisons est en mode "Swap" : les conducteur dépose un trailer plein et reparte avec un trailer vide ;
- Le temps d'échange entre trailer chez un HRS est de 30min ;
- La vitesse moyenne d'un camion est 50km/h ;

- Il y a 2 shifts pour les chauffeurs : 5h-13h et 13h-21h ;
- Il y a 3 chauffeurs par shift ;
- Le filling Center ne tourne pas entre 00h et 04h00. On considère que les trailers rentrés avant 00h seront remplis instantanément à 04h00 du matin, pour se rapprocher au maximum du fonctionnement réel.
- Les contraintes sur les clients peuvent être résumées dans le tableau suivant :

	HRS 1	HRS 2	HRS 3	HRS 4
Distance du FC (en km)	100	150	50	20
Consommation quotidienne d'hydrogène (en kg)	1000	1500	500	200
Horaires d'opération	04h00 – 24h00			

TABLEAU 3 – Contraintes des clients

2.5 Ressources du modèle

Le modèle comporte deux ressources différentes :

- 1 opérateur au Filling Center ;
- 3 chauffeurs pour chacun des 2 shifts (5h-13h et 13h-21h) qui doivent commencer et finir leur trajet au Filling Center.

2.6 Hypothèses & simplifications

Pour simplifier le modèle, nous avons d'abord introduit quelques simplifications supplémentaires :

- Les trailers ont des capacités de 70 unités de 10kg d'hydrogène ;
- Le processus de branchement des trailers aux bornes de remplissage du Filling Center prend 10 minutes, pendant lesquelles l'opérateur est occupé ;
- Le remplissage en lui-même ne nécessite pas l'intervention de l'opérateur ;
- Une fois le remplissage terminé, l'opérateur débranche le trailer, ce qui prend également 10 minutes pendant lesquelles il est occupé ;
- Les trailers de retour ne sont pas nécessairement vides.

Au cours de l'évolution du projet nous avons supprimés des hypothèses faites *a priori* sur :

- La vitesse constante des camions à 50 km/h ;
- La vitesse de consommation d'hydrogène est constante pour chaque client.

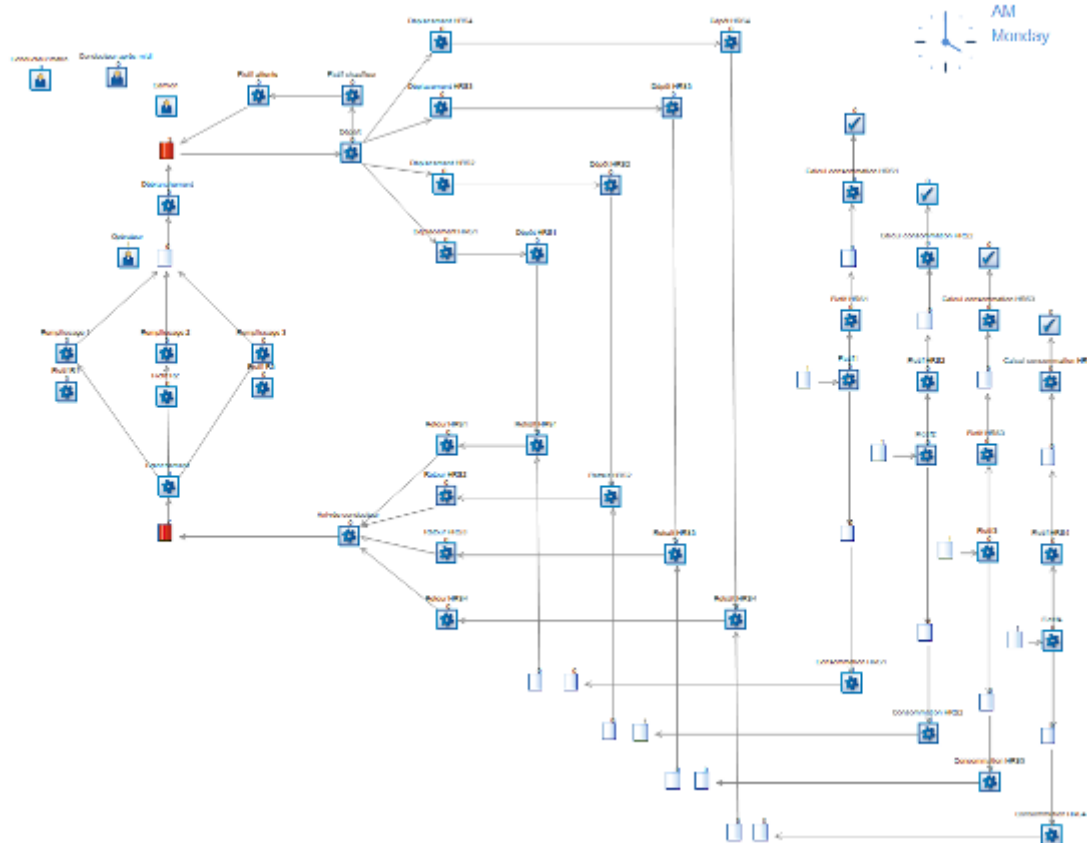
Afin de retenir les hypothèses suivantes :

- La durée de trajet des chauffeurs peut varier et tend à être plus longue en raison de la possibilité de congestion routière. ;
- La vitesse de consommation d'hydrogène par chaque client peut également varier.

3 Construction du modèle sur *Simul8*

3.1 Présentation du modèle global

Notre modèle *Simul8* est le suivant :



3.2 Démarche & réflexion

Pour répondre à la demande d'air liquide nous avons réajusté une modélisation à deux composantes principales comme cela pourrait l'être dans la réalité. On retrouve à gauche le Filling Center, qui s'occupe du remplissage des trailers, de leur attribution aux chauffeurs et de leur envoi vers les différents HRS. A droite, les 4 HRS sont les endroits où les chauffeurs déposent leurs trailers pleins et en récupèrent des partiellement vides. Ce sont également les endroits où l'hydrogène est consommé. Bien que ces deux parties interagissent entre elles, elles seront expliquées séparément pour plus de clarté.

Il est également à noter que nous avons pris le parti de faire fonctionner la simulation pendant 20 heures chaque jour (de 4h00 à 0h00), correspondant aux horaires de fonctionnement des HRS. Idéalement, la simulation devrait fonctionner en continu (notamment pour le Filling Center qui fonctionne 24 heures sur 24), mais cela n'est pas possible en raison des contraintes du logiciel. Nous avons donc dû faire des hypothèses à ce sujet dans la partie 2.4.

Pour simplifier, nous désignerons comme "trailer vide" tout trailer ramené par un conducteur depuis un HRS après avoir été consommé. Il est cependant important de noter que puisque nous avons choisi de ne pas faire attendre les chauffeurs aux HRS jusqu'à ce que les remorques soient entièrement vides, ce qui serait peu productif, certains de ces trailers ne sont pas complètement vides.

3.3 Centre de remplissage

Quels que soient leurs HRS d'origine, tous les trailers vides retournent au FC via l'activité fictive "Arrivée conducteur", qui vise uniquement à libérer la ressource "camion". Ensuite, ils

entrent dans une file d'attente (le parking "trailers vides") si l'opérateur responsable du branchement et du débranchement est occupé. Une fois disponible, cet opérateur effectue le branchement du trailer (opération de 10 minutes), puis il est affecté à l'une des trois "Remplissage" où il est rempli.

La quantité d'hydrogène présente dans un trailer est à tout moment représentée par un label "L gaz", prenant une valeur entre 0 et 70, correspondant à un nombre de dizaines de kilogrammes d'hydrogène (0 pour un trailer vide, 70 pour un trailer plein contenant 700 kg d'hydrogène). Les trailers doivent donc quitter le "Remplissage" avec un label "L gaz" de 70, mais le temps qu'ils y passent dépend de la valeur initiale de ce label.

Selon les données fournies par Air Liquide, le temps de remplissage complet d'un trailer est de 5 heures. Par conséquent, il faut 4,29 minutes pour remplir 10 kilogrammes d'hydrogène, ce qui correspond à une incrémentation du label "L gaz". Nous avons donc décidé de fixer la durée de l'activité "Remplissage" à 4,29 minutes et de faire en sorte, grâce à un code Visual Logic, que chaque trailer passe plusieurs fois par cette activité consécutivement jusqu'à ce qu'il soit plein. Cela nous permet de prendre en compte l'impact du niveau de remplissage initial du trailer sur le temps qu'il passe au "Remplissage".

Pour garantir que chaque trailer ne quitte réellement la "Filling bay" que lorsqu'il est plein, nous utilisons le code Visual Logic mentionné ci-dessus. Son objectif est simplement de déplacer les trailers non encore pleins vers une activité fictive "Fictif FB1", puis de les ramener instantanément dans la "Filling bay" (de cette manière, nous nous assurons qu'un trailer qui vient de sortir de l'activité "Branchement" ne prend pas la place d'un trailer encore en cours de remplissage).

Une fois le trailer rempli, l'opérateur procède à l'activité de "Débranchement" (10 minutes), puis le trailer est placé dans une file d'attente correspondant au parking "trailer plein" en attendant qu'un conducteur soit disponible.

Pour modéliser les shifts des conducteurs, nous avons choisi de les diviser en deux ressources distinctes (pour l'hypothèse sans dimanche) : "conducteur matin" avec un shift de 5h à 13h et "conducteur après-midi" avec un shift de 13h à 21h (1 ressource supplémentaire pour un shift le samedi après-midi et une autre pour le lundi matin). Ces ressources sont ensuite regroupées sous "camion" grâce à la fonctionnalité "Pool resources".

3.4 Algorithme de répartition

L'algorithme de répartition, implémenté via un code Visual Logic dans le bloc "Départ", joue un rôle crucial dans la détermination du HRS vers lequel un trailer plein et un camion doivent se diriger.

Tout d'abord, nous avons initialisé plusieurs variables globales :

- "TempsRestant" : la durée restante en minutes avant la fin du shift actuel du chauffeur ;
- "TrajetComplet" : variables relatives au temps nécessaire pour réaliser un aller-retour ainsi que l'échange d'un trailer pour chaque HRS, avec une marge de 5% pour éviter les heures supplémentaires imprévues ;
- "ConsommationMin" : variables indiquant la consommation minimale d'hydrogène pour chaque HRS par minute ;
- "TempsTrajet" : variables indiquant le temps de trajet jusqu'à chaque HRS (aller simple) ;

- "L client" : label utilisé pour déterminer le routing du trailer, initialement fixé à 5, correspondant à la voie d'attente;
- "PrioriteMin" : variable qui servira à garder en mémoire la valeur minimale de notre variable de décision.

Tout cela donne :

```

-- Répartition chauffeurs
-- SET HeureActuelle = REALMOD[Simulation Time\1200]
-- Select Current Work Item Départ , 0
-- SET HeureEntree = L HeureEntreeFC
-- SET JourEntree = L JourEntree
-- SET JourActuel = [Simulation Time-HeureActuelle]/1200
-- IF HeureActuelle <= 540
--   SET TempsRestant = 540-HeureActuelle
--   SET L shift = 1
-- ELSE
--   SET TempsRestant = 1020-HeureActuelle
--   SET L shift = 2
-- SET TrajetComplet1 = Données clients[4,2]*1.05
-- SET TrajetComplet2 = Données clients[4,3]*1.05
-- SET TrajetComplet3 = Données clients[4,4]*1.05
-- SET TrajetComplet4 = Données clients[4,5]*1.05
-- SET ConsommationMin1 = Données clients[2,2]
-- SET ConsommationMin2 = Données clients[2,3]
-- SET ConsommationMin3 = Données clients[2,4]
-- SET ConsommationMin4 = Données clients[2,5]
-- SET TempsTrajet1 = Données clients[3,2]
-- SET TempsTrajet2 = Données clients[3,3]
-- SET TempsTrajet3 = Données clients[3,4]
-- SET TempsTrajet4 = Données clients[3,5]
-- SET L client = 5
-- SET PrioriteMin = 800

```

La suite de l'algorithme vise à déterminer vers quel HRS le trailer doit se diriger, en respectant la contrainte selon laquelle les chauffeurs doivent revenir au Filling Center avant la fin de leur shift. Pour chaque HRS, nous comparons d'abord le temps de trajet complet avec la marge de 5% avec le temps restant avant la fin du shift : si le temps disponible est insuffisant, le chauffeur ne partira pas vers ce HRS.

Ensuite, nous cherchons à établir une variable de décision pour choisir le HRS ayant le plus besoin d'hydrogène. Nous prenons en compte sa consommation, son stock actuel d'hydrogène, et le temps nécessaire pour s'y rendre. Nous utilisons la formule suivante

$$\text{priorite}_i = \frac{\text{Stock effectif}_i}{\text{Consommation}_i}$$

Avec la définition suivante :

$$\text{Stock effectif}_i = \text{Stock} - \text{Consommation} \times \text{Temps trajet}$$

Cette formule représente le temps restant de fonctionnement du HRS avec son stock actuel, calculé à partir du moment où un conducteur y arrive. Nous calculons cette grandeur pour chaque HRS viable (où le chauffeur peut se rendre avant la fin de son shift), puis la comparons avec la valeur minimale trouvée jusqu'à présent. Si tous les HRS ont une autonomie supérieure à 800 minutes, le camion restera au Filling Center pour éviter un trajet inutile.

```

IF "remplissage" > "trajetcomplet"
  IF Déplacement HRS.Count Contents <= 0 OR HRS.Count Contents < Capacity
    SET Stock = [((Sequence For Calcul Consumption HRS.Count Contents) * (Sequence For "Lubrifiant Count Contents") * (Remplissage HRS.Count Contents)) + (Remplissage HRS.Count Contents)]
    SET Priorité = [Stock / (Consumption * (Sequence For "Lubrifiant Count Contents") * (Remplissage HRS.Count Contents))]
    IF Priorité < PrioritéMin
      SET PrioritéMin = Priorité
      SET i client = i
    ...
  IF "remplissage" > "trajetcomplet"
    IF Déplacement HRS.Count Contents <= 0 OR HRS.Count Contents < Capacity
      SET Stock = [((Sequence For Calcul Consumption HRS.Count Contents) * (Sequence For "Lubrifiant Count Contents") * (Remplissage HRS.Count Contents)) + (Remplissage HRS.Count Contents)]
      SET Priorité = [Stock / (Consumption * (Sequence For "Lubrifiant Count Contents") * (Remplissage HRS.Count Contents))]
      IF Priorité < PrioritéMin
        SET i client = i
        SET PrioritéMin = Priorité

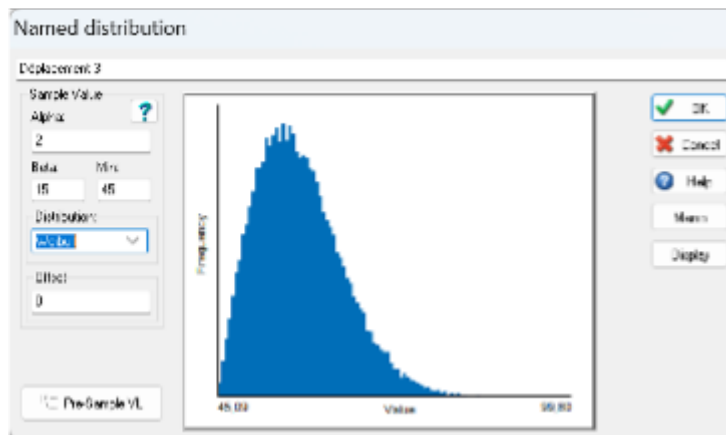
```

Pour modéliser le fait qu'un conducteur reste au Filling Center (soit parce qu'il n'y a plus assez de temps pour se rendre à un HRS, soit parce qu'aucun trajet ne serait utile), nous utilisons une boucle : une première activité fictive libère la ressource correspondante, puis une activité d'attente fait patienter le trailer une minute avant qu'il ne revienne au parking "trailers pleins". Cette boucle est associée à la valeur "L client = 5" dans le routing out du bloc "Départ".

3.5 Hydrogen Refuelling Station (HRS)

Pour expliquer comment un Hydrogen Refuelling Station (HRS) est modélisé, nous allons prendre comme exemple le 3ème HRS. Le fonctionnement des autres HRS est très similaire, avec une exception que nous détaillerons ultérieurement.

Une fois que l'algorithme de décision a déterminé vers quel HRS le chauffeur doit se rendre, celui-ci commence son trajet. Si le HRS désigné est le 3ème, comme supposé pour cette explication, le camion passe d'abord par une phase de trajet vers le HRS3. La durée de ce trajet est régie par une loi Weibull, de paramètres $\alpha = 2$, $\beta = 15$ et $Min = 45min$.



Les raisons qui nous ont poussé à choisir cette distribution avec ces paramètres sont les suivantes :

- Maintien d'une vitesse moyenne autour de 50 km/h (correspondant à 60 minutes pour le HRS3), conforme aux données fournies par Air Liquide ;

- Utilisation d’une distribution où les trajets extrêmement courts ou longs sont peu probables ;
- Utilisation d’une distribution asymétrique, privilégiant des trajets légèrement plus longs (étant donné que les retards sur la route sont plus fréquents que les trajets plus rapides).

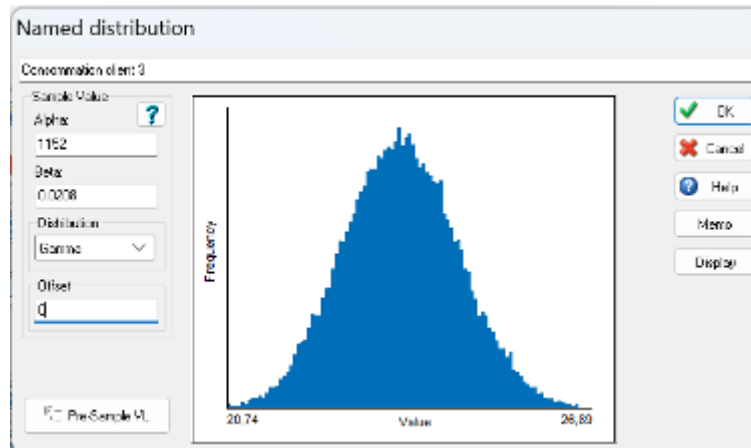
Des lois de Weibull ont également été utilisées pour représenter les temps de trajet vers les autres HRS, seuls les paramètres ont changé.

Le chauffeur arrive alors au “Dépôt HRS3”, une étape d’une durée de 30 minutes durant laquelle il dépose son trailer. Un code Visual Logic est également mis en place pour assurer le bon fonctionnement de l’échange de trailers, soit :

- Si un trailer vide est disponible, il est récupéré par le chauffeur ;
- Si le trailer en cours d’utilisation n’est pas vide, la quantité d’hydrogène restante dans le trailer est évaluée, le label correspondant ainsi que le stock sont mis à jour, puis le trailer est récupéré.

Ensuite, le chauffeur se dirige vers l’activité de “Retrait HRS3” où il récupère son trailer vide puis il repart vers “Retour HRS3” jusqu’à être démobilisé dans l’activité “Arrivée chauffeur”. Nous avons considéré que cette étape était instantanée, la plus grande partie de temps étant consacré au déchargement de la citerne pleine.

Du côté du HRS, le trailer plein est représenté par un jeton. Ce jeton est ensuite dupliqué dans l’activité “Fictif 3”, puis transmis au bloc “Consommation 3” ou à sa file d’attente respective. Cette activité se termine dès qu’une remorque est entièrement vide. Dans une autre branche, l’activité “Fictif HRS3” génère 70 jetons qui représentent les 700 kg d’hydrogène ajoutés à une file d’attente symbolisant le stock. Dans un second temps, l’activité “Calcul consommation HRS3” consomme ce stock, à un rythme de 10 kilogrammes par 10 kilogrammes, selon une loi gamma centrée autour de la durée attendue pour la consommation de 10 kilogrammes d’hydrogène par le HRS (24 minutes pour le HRS3 dans ce cas) et avec une variance de 0,4.



L’activité “Calcul consommation HRS3” possède un code Visual Logic qui permet la synchronisation de l’activité avec le bloc “Consommation HRS3”, qui ne connaît pas a priori les variations potentielles du temps de consommation.

Ainsi, le modèle fonctionne sur le principe de l’échange : lorsqu’un chauffeur dépose un trailer, il en récupère immédiatement un autre. Le nombre de trailers dans chaque HRS reste donc constant dans le temps, d’où l’importance de l’initialisation : chaque HRS commence avec un seul trailer plein, sauf le HRS2 qui commence avec 2 trailers, un plein et un vide. Cela lui permet d’avoir un stock deux fois plus important que les autres HRS (1 400 kg au lieu de 700 kg), ce qui est crucial étant donné sa forte consommation et sa distance éloignée du Filling Center.

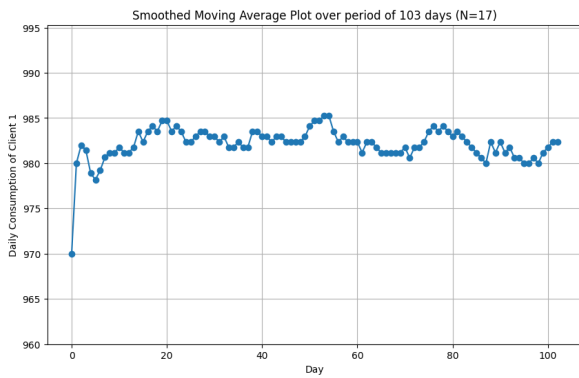
4 Validation et fiabilité du modèle

4.1 Warm-up

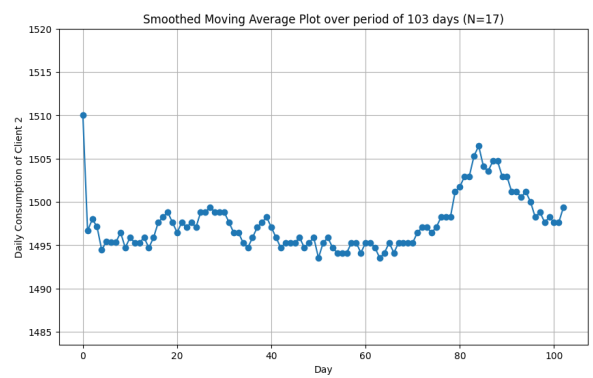
Avec Run Trial, et en prenant comme critère *la consommation de chaque client*, nous avons constaté qu'il faut 4 essais pour atteindre une précision de 5% en intervalles de confiance. Pour être davantage sûr de nos résultats nous avons pris une petite marge et avons effectué chaque trial avec 6 essais.

Ensuite, nous avons utilisé l'onglet Results Manager -> Time Interval Results pour obtenir les enregistrements pour chaque client à la fin de chaque journée (intervalles de 1200 minutes). Nous avons ensuite procédé au lissage par une moyenne glissante des résultats sur 103 jours avec une fenêtre égale à 17.

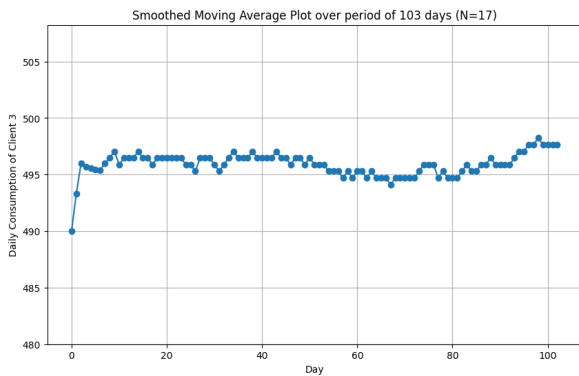
Nous obtenons les courbes suivantes :



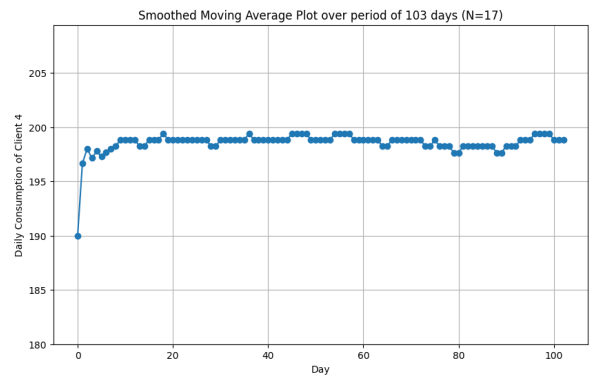
(a) Graphique 1



(b) Graphique 2



(c) Graphique 3



(d) Graphique 4

FIGURE 1 – Graphes des consommations journalières lissées des 4 clients pour 103 jours

a. Conclusion sur la durée du warm-up pour notre modèle

D'après les graphes ci-dessus, nous trouvons :

1. Warm-up de 20 jours pour le client 1
2. Warm-up de 6 jours pour le client 2
3. Warm-up de 13 jours pour le client 3

4. Warm-up de 10 jours pour le client 4

Nous choisissons donc le maximum, **20 jours**, comme période du warm-up. Nous nous intéresserons donc pour la discussion sur notre modélisation qu’aux résultats à partir du 21ème jour.

4.2 Validation du modèle Simul8

Pour vérifier l’efficacité de notre modèle informatique, nous avons procédé à des simulations à une vitesse délibérément lente. Cela nous a permis de suivre minutieusement l’évolution des éléments du système, tels que les représentations des chauffeurs et la consommation d’hydrogène chez les clients. Nous avons répété cette démarche à chaque ajustement du modèle afin de saisir pleinement l’impact des modifications et d’identifier tout éventuel dysfonctionnement nécessitant correction.

Ces tests initiaux ont confirmé plusieurs aspects essentiels du modèle :

- Les clients ne se trouvaient jamais en situation de pénurie d’hydrogène ;
- Les chauffeurs respectaient rigoureusement leurs contraintes opérationnelles ;
- L’opérateur était incapable d’intervenir simultanément sur plusieurs remorques.

4.3 Limites du modèle

Le modèle que nous avons construit permet de rendre compte d’un certains nombre de caractéristiques réelles de la situation. Cela nous permet de proposer une solution réaliste pour le problème d’Air Liquide. Néanmoins le modèle présente certaines simplifications hypothèses. Voici quelques aspects qui sont limités ou limitans dans la modélisation proposée et qui pourraient être améliorés :

- Faire courir la simulation sur une journée entière de 24h pour pouvoir s’adapter à un nombre plus important de trailers qui demanderait de libérer les places de remplissage pendant la nuit ;
- Une modélisation plus précise des temps de trajets serait possible avec une étude statistique des voies de circulation entre les localisations réelles du centre de remplissage et des clients ;
- De même, une étude statistique de la consommation des clients d’Air Liquide permet d’améliorer les distributions de consommation ;
- Un système de transmission d’information plus performant entre les HRS et le centre de remplissage permettrait de faire la livraison au moment le plus opportun et de repartir avec un trailer effectivement plein en fonctionnement swap au sens strict ;
- Il faudrait aussi prendre en compte les événements rares comme les accidents sur les trailers, les grèves, les arrêts maladies etc. ;
- On pourrait proposer des trailers avec plusieurs capacités pour s’adapter aux besoins des différentes consommations.

5 Recommandations

5.1 Choix des configurations

Pour déterminer le fonctionnement optimal répondant aux besoins de la supply chain, nous avons effectué des simulations sur différentes configurations, en variant les nombres de trailers vides et pleins ainsi que les places de parking associées. Ces configurations ont été évaluées en fonction de leur capacité à satisfaire les besoins des clients tout en optimisant l'efficacité opérationnelle du système.

Initialement, chaque client débute avec un trailer plein, à l'exception du client 2 qui requiert deux trailers pleins en raison de sa consommation élevée. De plus, le filling center est équipé de 3 rampes de remplissage, nécessitant ainsi au moins une place de parking pleine pour éviter une file d'attente réduite à zéro en sortie. Par conséquent, un total minimum de 9 trailers est requis au départ.

En ce qui concerne les places de parking, afin de maintenir un flux continu de trailers dans le système, nous avons déterminé qu'un minimum de 4 places pour trailers pleins au filling center était nécessaire, auxquelles s'ajoute une place de parking pour trailer vide en amont du système pour garantir un flux constant. Ainsi, un minimum de 4+1 places de parking est requis.

Sur la base de ces critères, nous avons sélectionné les configurations suivantes, considérées comme étant les plus pertinentes pour notre analyse :

1. **Configuration 1** : 11 trailers, avec 5 places pour trailers pleins au filling center et une place pour trailer vide en amont.
2. **Configuration 2** : 10 trailers, avec 5 places pour trailers pleins au filling center et une place pour trailer vide en amont.
3. **Configuration 3** : 10 trailers, avec 4 places pour trailers pleins au filling center et une place pour trailer vide en amont.
4. **Configuration 4** : 9 trailers, avec 4 places pour trailers pleins au filling center et une place pour trailer vide en amont.

5.2 Choix des métriques de performance

Pour évaluer et comparer les performances des différentes configurations testées, nous avons identifié plusieurs métriques clés :

- **Fonctionnement des HRS (%)** : Cette métrique représente le pourcentage de temps pendant lequel les stations HRS fonctionnent de manière ininterrompue. Assurer un fonctionnement continu est essentiel pour répondre aux attentes de nos clients.
- **Stock moyen de chaque HRS (en kg)** : Un faible stock moyen dans les stations HRS pourrait indiquer une vulnérabilité du système, où un imprévu à n'importe quel niveau de la Supply Chain pourrait avoir un impact significatif sur l'approvisionnement des clients.
- **Utilisation des chauffeurs et heures supplémentaires (en minutes par an)** : Cette métrique mesure le pourcentage d'utilisation des chauffeurs et la quantité d'heures supplémentaires qu'ils pourraient être amenés à effectuer. Minimiser les heures supplémentaires peut contribuer à une gestion efficace des ressources humaines.

- **Nombre de trajets vers les HRS** : Réduire le nombre de trajets nécessaires pour approvisionner les stations HRS est bénéfique tant d'un point de vue économique qu'environnemental, car cela peut réduire les coûts opérationnels et l'empreinte carbone.
- **Temps de stationnement moyen des trailers (parking trailers pleins)** : Cette métrique évalue le temps moyen que les trailers passent stationnés. Cela permet d'optimiser l'utilisation des infrastructures de stationnement.
- **Fonctionnement des rampes de remplissage (%)** : Cette métrique indique le pourcentage de temps pendant lequel les rampes de remplissage du Filling Center sont opérationnelles. Un haut pourcentage de fonctionnement est crucial pour maintenir un flux continu de remplissage des trailers.

En mesurant ces différentes métriques pour chaque configuration testée, nous serons en mesure de déterminer celle qui offre les meilleures performances globales, en tenant compte à la fois des besoins des clients, de l'efficacité opérationnelle et de la gestion des ressources.

5.3 Résultats et interprétation

a. Résultats

A	B	C	D	E
Configuration				
Trailers	11	10	10	9
Places de parking	5+1	5+1	4+1	4+1
Résultats				
Fonctionnement des HRS (en %)				
HRS1	100	100	100	99.99112
HRS2	100	100	100	93.32517
HRS3	100	100	100	100
HRS4	100	100	100	100
Stock moyen des HRS (en dizaine de kg)				
HRS1	50.82659	50.86466	50.86466	44.30969
HRS2	78.56314	78.66819	78.66819	63.10493
HRS3	44.45985	44.45864	44.45864	44.4454
HRS4	39.46543	39.46543	39.46543	39.50895
Nombre de trajets vers les HRS				
HRS1	1251	1253.16667	1253.16667	730.16667
HRS2	809.66667	807.5	807.5	730
HRS3	365	365	365	365
HRS4	121	121	121	121
Temps de stationnement moyen (en min)	1.04395	1.34649	0.81387	0.9778
Utilisation des chauffeurs (en %)	74.8066	74.72331	74.72331	57.62841
Temps de travail supplémentaire (en min)	873.19026	870.35287	870.35287	1058.62088
Fonctionnement des rampes de remplissage (en %)				
Rampe 1	36.30806	36.37254	36.37254	37.09537
Rampe 2	36.13398	35.73175	35.73175	37.15654
Rampe 3	37.24881	37.37775	37.37775	37.16135

b. Nombre de trailers nécessaires

Selon les résultats de nos simulations, il est impératif d'avoir au minimum 10 trailers pour garantir un fonctionnement continu de chaque client (HRS). En effet, avec seulement 9 trailers, le taux de fonctionnement des HRS 1 et 2 est légèrement inférieur à 100%, atteignant respectivement 99.99112% et 93.32517%, ce qui est inacceptable pour répondre aux exigences des clients.

Une option envisageable serait d'opter pour 11 trailers, ce qui pourrait potentiellement réduire le nombre de trajets nécessaires et l'utilisation des chauffeurs. Cependant, il est à noter que

l'ajout d'un trailer supplémentaire semble avoir un impact négligeable, voire négatif, sur ces métriques :

- L'utilisation des chauffeurs n'augmente que de 0.1% avec 11 trailers.
- Les heures supplémentaires des chauffeurs sont légèrement plus élevées avec 11 trailers.
- Le nombre de trajets vers les HRS reste sensiblement identique pour les deux configurations.

Ainsi, les coûts supplémentaires et la complexification induite par l'ajout d'un trailer pour des gains de performance aussi minimes ne semblent pas justifiés. En conséquence, il est préférable de conserver la configuration avec 10 trailers.

c. Nombre de places de parking nécessaires au Filling Center

Les emplacements de stationnement au sein du Filling Center jouent un rôle crucial dans le processus logistique. Ils permettent non seulement le remplissage des trailers, mais également l'attente des chauffeurs lorsque les trailers sont pleins, ainsi que l'attente du début du remplissage lorsque les trailers sont vides.

D'après nos différentes simulations, nous avons déterminé qu'un total de 5 places de stationnement est adéquat pour assurer le bon fonctionnement de la chaîne d'approvisionnement. Parmi celles-ci, 4 sont destinées au stationnement des trailers pleins et 1 est dédiée au stationnement des trailers vides, permettant ainsi d'optimiser les flux logistiques dans le centre.

Il est important de souligner que cette quantité de places de stationnement représente le minimum requis par la simulation, comme expliqué dans la première partie du rapport. De plus, bien que l'ajout d'une place de parking supplémentaire puisse sembler bénéfique pour optimiser le fonctionnement de la station, nos analyses démontrent un résultat paradoxal. En effet, l'introduction d'une place de parking supplémentaire entraîne une augmentation significative du temps d'attente moyen dans le parking, de plus de 60%.

5.4 Sans chauffeurs le dimanche

a. Méthodologie

Si nous envisageons de ne pas faire circuler de chauffeurs le dimanche, cela nécessitera des ajustements significatifs dans la chaîne d'approvisionnement, notamment pour garantir le fonctionnement des stations HRS. Dans ce contexte, nous avons opté pour une simplification du modèle en ne considérant que les modifications des principales variables suivantes, jugées pertinentes pour ce scénario :

- Le nombre de trailers supplémentaires.
- Le nombre de chauffeurs, en particulier le samedi après-midi et le lundi matin pour approvisionner les HRS avant le dimanche.
- La capacité des HRS : ces derniers devront stocker davantage de trailers pleins pour maintenir leur fonctionnement le dimanche sans livraison.

Nous avons observé que seules les capacités des HRS 1, 2 et 3 posent problème, et ce sont celles que nous ajusterons en conséquence. Ce résultat est dû à la faible consommation du HRS 4 dont la consommation moyenne permet l'utilisation d'un même trailer sur plusieurs jours.

En raison de la complexité du problème, nous avons restreint notre étude en ne considérant que le pourcentage de fonctionnement des HRS pour mesurer la performance du modèle. Pour ce faire, nous avons réalisé une série de simulations sur différentes configurations, en faisant varier les trois paramètres mentionnés, afin d'évaluer leur impact sur les performances.

b. Résultats et interprétation

Configuration	Initiale (0)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nombre de conducteur supplémentaire le lundi matin	0	1	2	1	2	2	2	2	2	1
Nombre de conducteur supplémentaire le samedi après-midi	0	1	2	1	2	2	2	2	2	1
Capacité supplémentaire du HRS1 (en dizaine de kg)	0	0	0	70	140	210	210	140	70	140
Capacité supplémentaire du HRS2 (en dizaine de kg)	0	0	0	70	140	210	210	140	140	140
Capacité supplémentaire du HRS3 (en dizaine de kg)	0	0	0	0	0	0	0	0	70	70
Nombre de trailers supplémentaire	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
Résultats	Initiale (0)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Consommation HRS1.Working %	73.53642	88.57807	88.36387	97.96296	99.93769	99.96095	100	100	98.0889	100
Consommation HRS2.Working %	69.88143	83.2153	84.63904	94.59849	97.41074	98.60224	99.9805	99.3108	97.74389	100
Consommation HRS3.Working %	82.97966	99.81115	99.89521	99.8984	99.92755	99.9699	99.85615	99.81722	100	100
Consommation HRS4.Working %	83.30294	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Stock moyen du HRS1 (en kg)	58.33333	70	70	139	209	279	279	209	139	209

FIGURE 2 – Résultats - sans chauffeurs le dimanche

Si nous tolérions un fonctionnement des HRS légèrement inférieur à 100%, la configuration 7 serait privilégiée, car elle offre un compromis satisfaisant entre l'utilisation des ressources et les résultats obtenus. Cependant, dans notre contexte, nous excluons cette possibilité : nous visons un fonctionnement permanent des HRS. Par conséquent, nous optons pour la configuration 9, qui garantit un fonctionnement à 100% de chacune des 4 HRS, tout en minimisant l'utilisation des ressources.

Ainsi, en envisageant l'arrêt de la circulation des chauffeurs le dimanche, nous recommandons d'augmenter la capacité des HRS 1, 2 et 3 de la porter respectivement à 210 kg, 280 kg et 140 kg d'hydrogène. On ajoute aussi un trailer supplémentaire en circulation avec une place supplémentaire sur le parking de stockage de trailers pleins. En conséquence, le nombre total de trailers serait augmenté de 10 à 17, et le nombre de chauffeurs le samedi après-midi et lundi matin serait de 1 sur chaque shift.

6 Conclusion

En conclusion, ce projet de modélisation de la supply chain d'un centre de remplissage nous a permis de mettre en lumière un problème d'approvisionnement concret. Il s'inscrit dans le contexte de transition énergétique, avec l'objectif actuel de réduire les transports et de promouvoir l'utilisation de l'hydrogène.

L'objectif principal était de minimiser le nombre de remorques et de places de parking tout en garantissant la satisfaction complète du client. Bien que notre modèle soit encore simpliste et largement ouvert aux améliorations, il permet d'obtenir des résultats tangibles qui facilitent la mise en œuvre du système par Air Liquide.