
METHODOLOGIE DE RECHERCHE

I. 1. Introduction.....	.....
I. 2. Démarche .....	.....
I. 3. Modèle logistique.....	.....
I.3.1 Chaîne logistique .....	.....
I.3.2 Entreprise .....	.....
I.3.3 Transport.....	.....
I.3.4 Flux de produits .....	.....
I. 4. Structure du modèle de simulation .....	.....
I. 5. Règles de gestion .....	.....
I.5.1 Règles d'approvisionnements et de livraison .....	.....
I.5.2 Règles de gestion des stocks .....	.....
I. 6. Paramètres.....	.....
I.6.1 Paramètres des entreprises .....	.....
I.6.2 Paramètres de transport.....	.....
I.6.3 Paramètres des produits .....	.....
I.6.4 Facteurs d'émissions d'équivalent de dioxyde de carbone .....	.....

I. 1. Introduction

L'état de l'art présenté dans la partie précédente nous permet de positionner nos travaux de recherche dans leur contexte. Ces derniers s'inscrivent dans la continuité des travaux d'(Essaïd M., 2008). Sa thèse portait sur la connectivité des flux logistiques. Nous élargissons son modèle à l'étude d'une chaîne logistique verte. De nombreuses études analysent la logistique inverse ou le design des produits. Mais peu s'intéressent aux émissions d'équivalent carbone de la chaîne logistique elle-même. Dans ce contexte, il nous semble intéressant d'explorer cette piste de recherche.

Deux approches de modélisation sont envisageables : générative et évaluative. La première a pour but une solution optimale. Ceci empêche donc toute généralisation et trouve ses limites face à la complexité des chaînes logistiques. La seconde compare différents scénarios grâce notamment à la simulation. Cette approche nous paraît plus adaptée à notre recherche.

Notre recherche a pour objectif de proposer un guide d'aide à la décision pour la configuration de chaîne logistique verte. Le modèle de chaîne logistique peut être instancié suivant un certain nombre de paramètres. Nous définissons ainsi différents profils de chaînes logistiques. Ils ont tous en commun un processus de fabrication et un mode de gestion. Mais ils ont trois facteurs de différenciation possibles : leur capacité modélisée par le taux de rendement synthétique, le type de produits fabriqués et la localisation de chacun de leurs maillons. Ces différentes configurations sont ensuite simulées. Nous les analysons en termes de stocks, taux de remplissage des modes de transport, taux de service et émissions d'équivalent CO₂.

Notre travail tente de répondre à la question : comment assurer une bonne performance environnementale tout en gardant une bonne performance logistique, financière et un bon taux de service ?

I. 2. Démarche

La chaîne logistique étudiée a plusieurs profils possibles. Toutes les chaînes simulées ont des caractéristiques communes : leur type de process et leur système de pilotage. par contre, chacune possède des facteurs de différenciation. Trois données techniques sont modifiables : la capacité du process, la localisation et le type de produits. Chacune de ces données peut prendre quatre valeurs différentes.

Evaluation des impacts simultanés de la localisation, de l'efficacité et du type de produits fabriqués sur les performances environnementales et financières d'une chaîne logistique

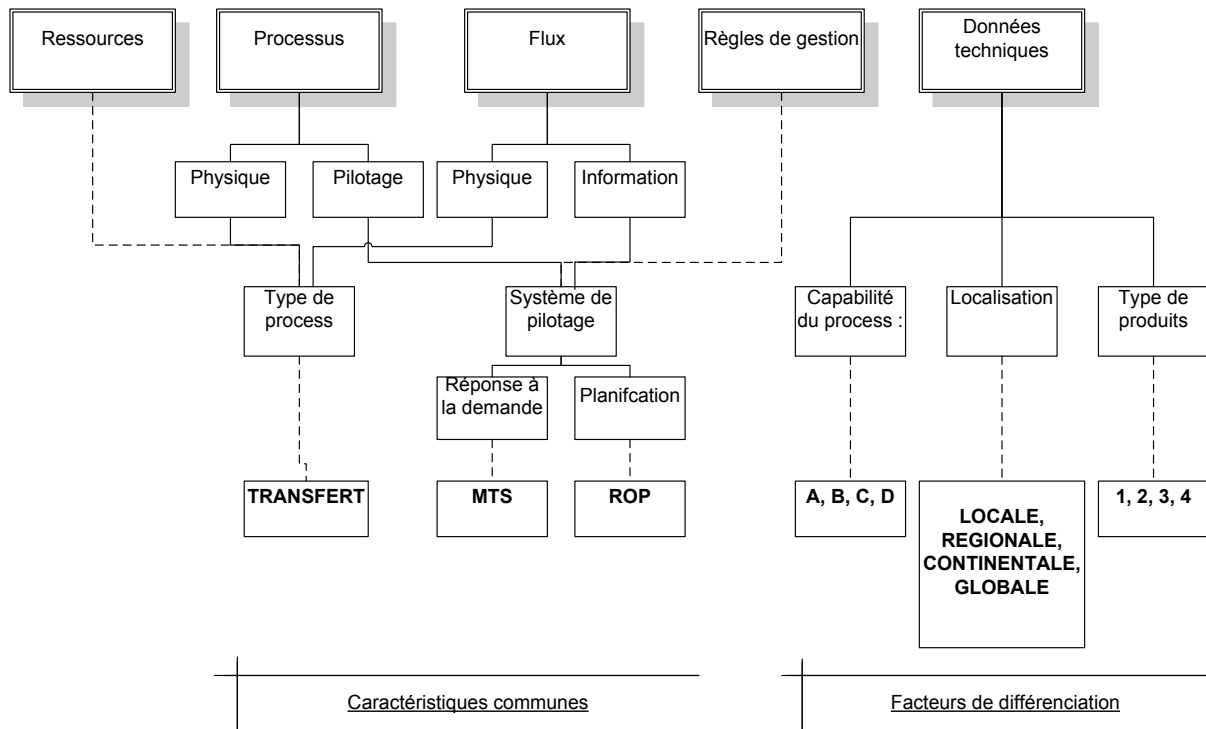


Figure 33 : Construction de profils d'entreprises

Les trois entreprises composant la chaîne logistique étudiée ont donc le même type de process (transfert), le même système de pilotage (réponse à la demande : MTS; planification : ROP). Par contre, les données techniques varient. Les entreprises ont des profils différents :

	Entreprise 1				Entreprise 2				Entreprise 3			
Efficacité (A,B,C,D)	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
Localisation - local=l - régional=r - continental=c - global=g	l	r	c	g	l	r	c	g	l	r	c	g
Type de produits - petit/léger : 1 - petit/lourd : 2 - grand/léger : 3 - grand/lourd : 4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4

Le type de produits restent le même tout au long de la chaîne.

Tableau 9 : Profils d'entreprises

I. 3. Modèle logistique

I.3.1 Chaîne logistique

Le cadre de notre étude est la configuration d'une chaîne logistique verte à travers différents profils pour répondre à une demande de marché.

Le modèle proposé (figure 34) consiste en un fournisseur de matières premières, une chaîne logistique composée de trois entreprises et un client final. Le fournisseur de matière première est considéré à stock infini. Les commandes du client final suivent une demande externe stochastique. Cette demande concerne deux produits dont la fabrication et les livraisons sont indépendantes.

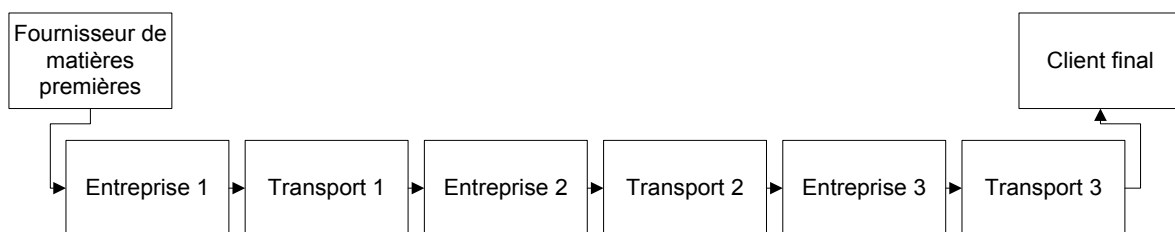


Figure 34 : Modèle de chaîne logistique

I.3.2 Entreprise

Chaque entreprise comporte (figure 35) un module réception et deux processus en série, transformant les matières premières (MP) en produits semi-finis (PSF) et les PSF en produits finis (PF). Les processus de production sont des lignes de transfert sur lesquelles deux flux de produits sont traités simultanément.

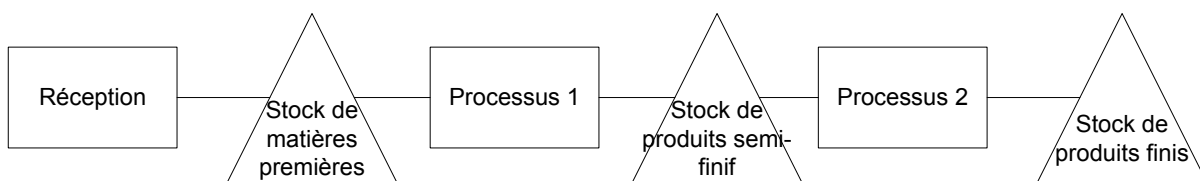


Figure 35 : Modèle d'entreprise

I.3.3 Transport

Entre chaque entreprise, un module de transport permet de simuler différents types de transport par : air, eau, route voire rail (figure 36). De plus, deux types de stock tampon sont dimensionnés selon la fréquence et le délai de livraison.

Un collecteur de données CO₂ est relié aux trois modules de transport.

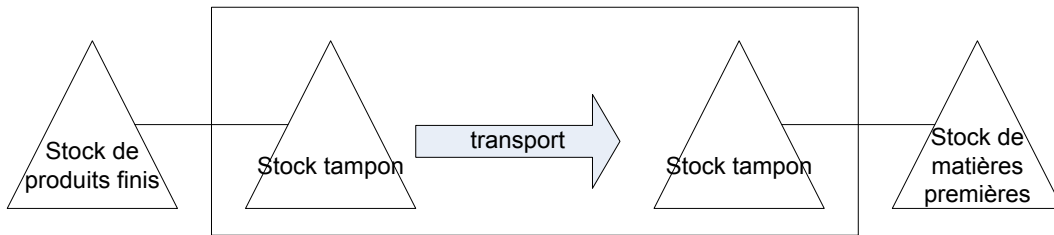


Figure 36 : Modèle de transport

I.3.4 Flux de produits

Nous avons choisi un flux de deux produits par transfert (T) car nous n'étudions pas les émissions dues au mode de fabrication et afin de simplifier le modèle de simulation. La configuration du flux de deux produits permettra lors de futures recherches de simuler d'autres modes de fabrication : assemblage et différenciation.

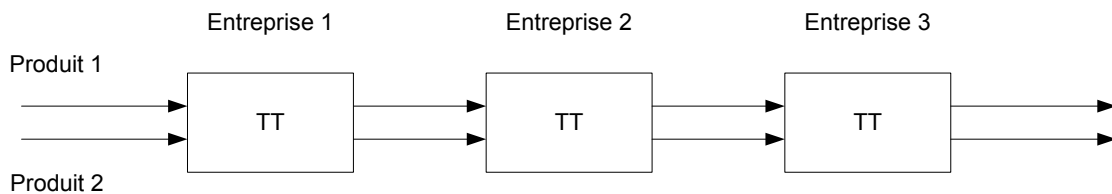


Figure 37 : Process de production

Cette chaîne logistique est modélisée sous ARENA. Nous allons donc étudier la structure du modèle sous ce logiciel.

I. 4. Structure du modèle de simulation

La structure du modèle implanté sous ARENA est la suivante :

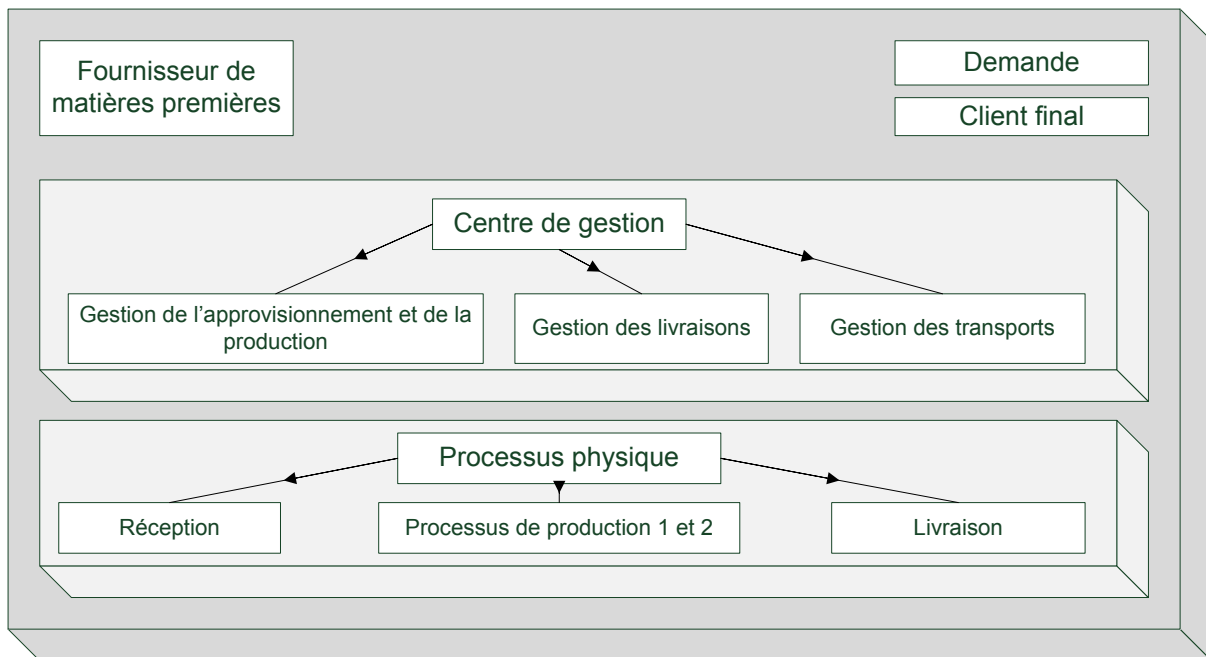


Figure 38 : Structure du modèle sous ARENA

La station fournisseur est activée dès que l'entreprise 1 passe une commande de matières premières.

La demande crée alternativement toutes les 24 heures deux commandes pour chacun des deux produits selon une loi normale $N(50,5)$.

La station client final compte les commandes et les quantités livrées. Elle enregistre également les commandes à l'heure et en retard pour calculer le taux de service servant d'indicateur de performance.

Le centre de gestion gère le pilotage de la chaîne logistique et comporte trois stations.

La première concerne l'approvisionnement et la production (figure 39).

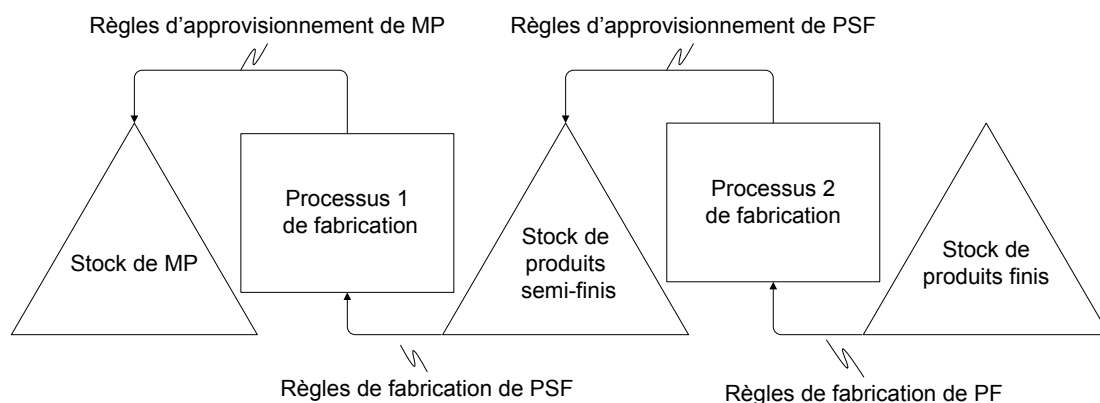


Figure 39 : Schéma des règles au sein de l'entreprise

Selon les numéros attribués à chaque maillon de la chaîne (figure 40), elle applique différentes règles de gestion (figure 41) que nous expliciterons au paragraphe 1.5.1.

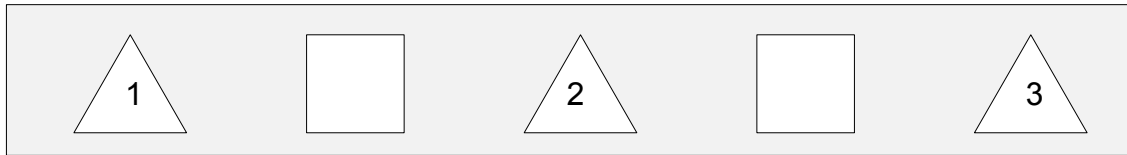


Figure 40 : Exemple de numérotation pour l'entreprise 1

La deuxième station ordonne les livraisons.

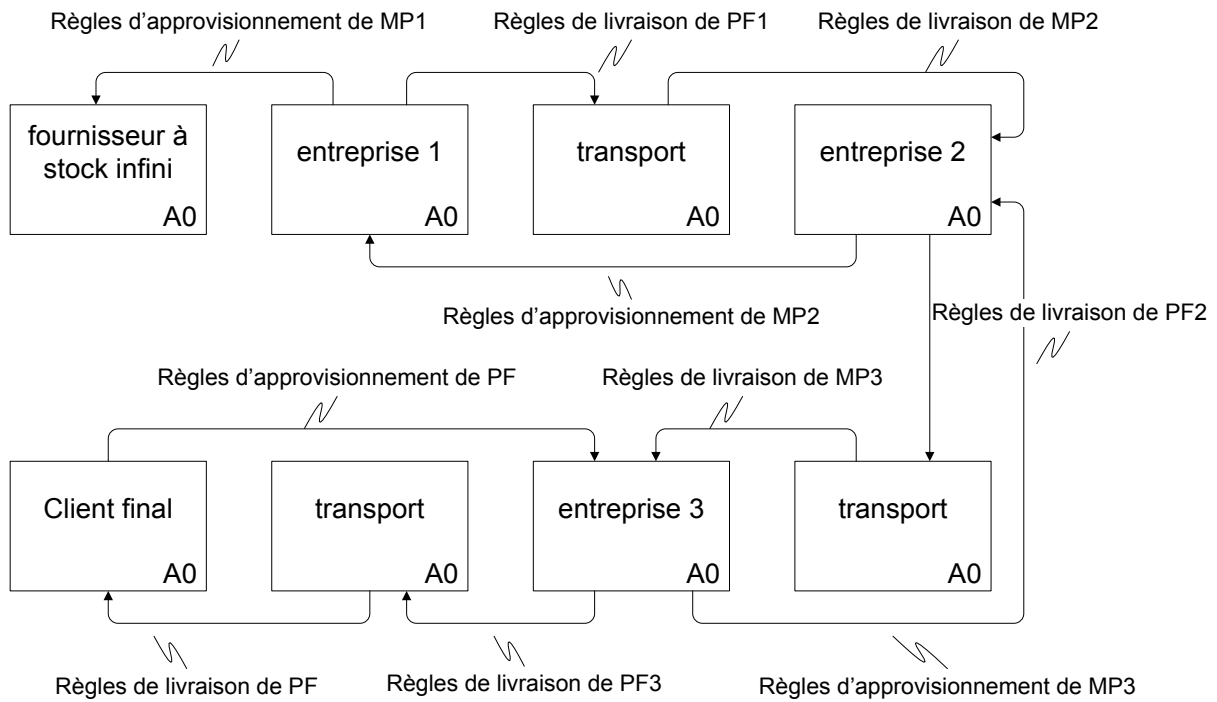


Figure 41 : Schéma des règles d'approvisionnement et de livraison pour la chaîne logistique

La troisième gère les transports selon des règles expliqués au paragraphe 1.5.2. Elle comporte de plus un compteur d'émissions de CO₂ dues au transport.

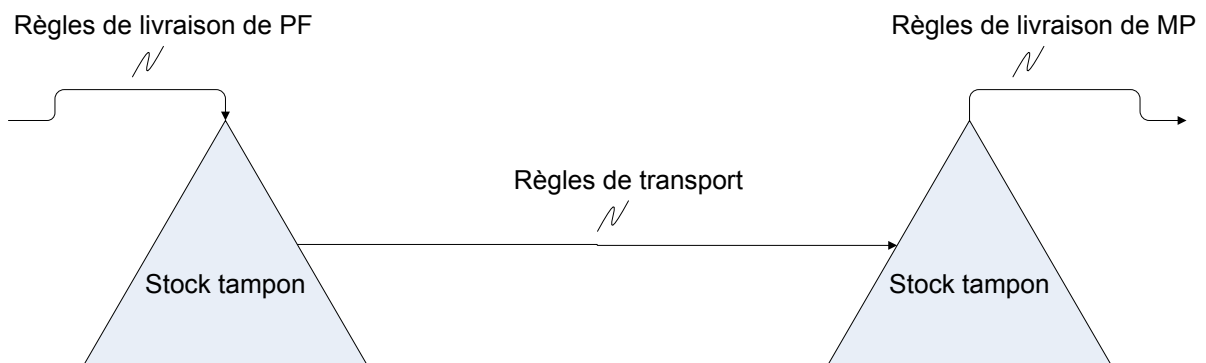


Figure 42 : Schéma des règles de transport

Le système physique est un ensemble de stations :

- Réception,
- Production,
- Livraison.

La réception enregistre les entrées de matériaux. La production est un enchaînement de deux processus de fabrication séparés par un stock de produits semi-finis. Les paramètres des processus dépendent de l'efficacité de l'entreprise. La livraison, selon des règles explicitées au paragraphe 1.5.1, permet l'expédition des produits finis à l'entreprise suivante.

I. 5. Règles de gestion

I.5.1 Règles d'approvisionnements et de livraison

Dans le centre de gestion, les règles d'approvisionnements sont les suivantes. A partir de la commande passée à l'entreprise 3 par le client final, l'entreprise 3 scrute son stock.

- Si le stock de produits finis est supérieur à la quantité commandée, le nombre de produits commandés part en livraison. Un signal indique au module de transport qu'une livraison est prête. Les transports sont périodiques. Pour des raisons de paramétrage de simulation, les commandes sont traitées dès leur arrivée dans le module de transport. Un temps d'attente est calculé selon leur date de réception et rajouté au temps de transport de chaque commande. Ce temps⁹ est calculé ainsi :

$$\text{temps d'attente} = \left(E \left(\frac{\text{date de réception}}{\text{fréquence des transports}} \right) + 1 \right) \times \text{fréquence de transport} - \text{date de réception}$$

Dans le cas de configurations continentale ou globale, si la date de commande est inférieure à la date de réception de la commande dans le module transport additionnée du temps d'attente et de la durée de transport, un transport en avion est paramétré. La livraison est réceptionnée chez le client final. Deux compteurs (commandes en retard ou à l'heure) permettent le calcul du taux de service.

- Si le stock de produits finis est égal ou supérieur à 75% de la commande, la quantité en stock part en livraison. Un ordre de fabrication de produits finis est lancé pour le reliquat. La quantité commandée correspond à la taille de lot. Le stock est scruté toutes les heures et le reliquat sera livré dès que le niveau de stock le permettra. Il n'y a pas de reliquat de reliquat.
- Si le stock est inférieur à 75% de la commande, la livraison attend et une commande de produits finis est passée. Puis, le stock est scruté toutes les heures pour vérifier son

⁹ Exemple : pour un temps de réception de la commande à la 25ème heure et une fréquence de transport de 4h. Le temps d'attente sera de

$$\left(E \left(\frac{25}{4} \right) + 1 \right) \times 4 - 25 = 7 \times 4 - 25 = 3 \text{ heures}$$

niveau. Dès qu'un niveau de stock suffisant est atteint, la commande est livrée par le module transport avec les mêmes règles que celles décrites précédemment.

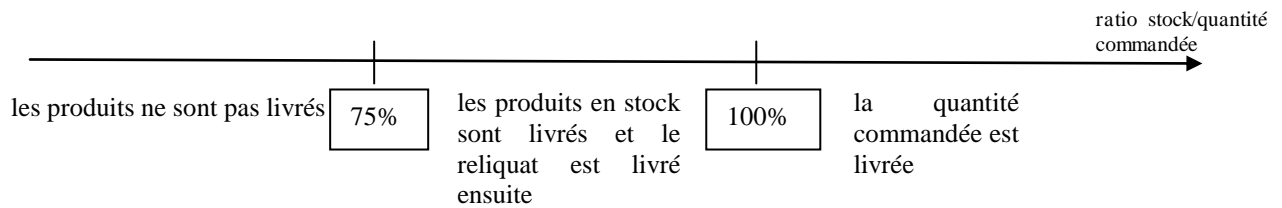


Figure 43 : Règles de livraison

Si une commande de produits finis est passée, le stock de produits semi-finis est scruté :

- Si son stock est supérieur à la quantité commandée, la fabrication de produits finis est lancée.
- Si son stock est inférieur à la quantité commandée, une commande de matières premières est passée.

Le stock de matières premières est alors scruté :

- Si ce stock est supérieur à la quantité commandée, la fabrication de produits semi-finis est lancée.
- Si le stock est inférieur à la quantité commandée, une commande de produits finis est passée à l'entreprise 2.

Les règles sont identiques pour l'entreprise 2 une fois que l'entreprise 3 lui passe une commande ; de même pour l'entreprise 1 une fois que l'entreprise 2 lui passe une commande.

I.5.2 Règles de gestion des stocks

Indépendamment des commandes, les différents stocks sont scrutés toutes les heures :

- Pour les entreprises 2 et 3 :
 - o Un seuil de sécurité est défini :

stock de sécurité

$$= \text{demande moyenne} \times \left(\frac{1}{\text{taux de performance} \times \text{taux de disponibilité}} - 1 \right)$$

Si les stocks de produits finis et semi-finis sont inférieurs au seuil de sécurité mis en place pour palier les aléas, rebuts, etc. , des ordres de fabrication sont lancés.

- o Un deuxième stock de sécurité pour les matières premières est défini en tenant compte du transport des pièces :

stock de sécurité de MP

$$= \text{stock de sécurité} + \text{consommation moyenne par heure} \times (\text{fréquence de transport} + \text{durée de transport en heures})$$

Si le stock de matières premières est inférieur au seuil de sécurité additionné au stock tampon dus à la fréquence et à la durée des transports, une commande de matières premières est passée.

Commande si stock < seuil de sécurité de MP

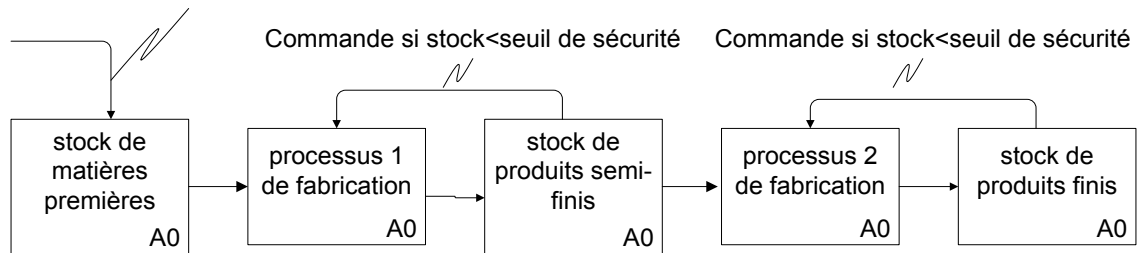


Figure 44 : Schéma des règles pour les entreprises 2 et 3

- Pour l'entreprise 1, si les trois stocks sont inférieurs au seuil de sécurité, des ordres de fabrication ou commande de matières premières sont lancés. En effet, le fournisseur de matières premières initial est à stock infini et à durée de transport nulle.

Commande si stock < seuil de sécurité

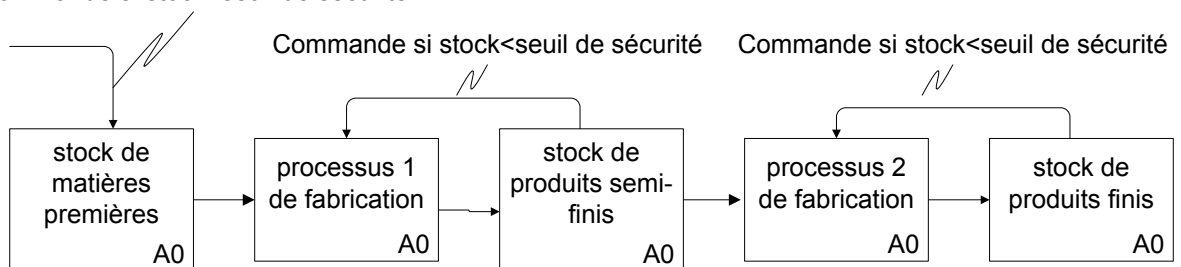


Figure 45 : Schéma des règles pour l'entreprise 1

Afin d'instancier le modèle, plusieurs paramètres sont nécessaires :

- paramètres des entreprises,
- paramètres de transport.

I. 6. Paramètres

I.6.1 Paramètres des entreprises

Nous avons défini quatre classes d'efficacité en reprenant les travaux d'(Essaïd M., 2008). Chacune est définie par un intervalle de taux de rendement synthétique :

- classe A : $80\% < \text{TRS} < 97\%$,
- classe B : $65\% < \text{TRS} < 79\%$,
- classe C : $50\% < \text{TRS} < 64\%$,
- classe D : $38\% < \text{TRS} < 49\%$.

Les entreprises de classe A sont les plus performantes, les entreprises de classes B,C et D correspondent à une dégradation des différents indicateurs de performance de respectivement 5%, 10% et 20 %. Le taux de rendement synthétique est calculé de la manière suivante :

$$\text{disponibilité} \times \text{performance} \times \text{qualité}$$

Pour chaque classe, ces trois critères sont fixés. A partir du TRS, nous obtenons les paramètres nécessaires pour caractériser les entreprises. Considérons les différents temps ci-dessous :

Temps de Production Planifié (TPP)	
Temps Opérationnel (TO)	Pertes de disponibilité
Temps Opérationnel Net (TON)	Pertes de performance
Temps Productif (TP)	Pertes de qualité

Tableau 10 : Définition des différents temps

A partir du TRS et du TPP, nous obtenons le TO :

$$\text{temps opérationnel} = \text{TPP} \times \text{pourcentage de disponibilité}$$

Nous fixons le TPP à 10 heures par jour. Les temps dépendront de la capacité de l'entreprise.

D'après le tableau, le TON est calculé à partir du TO :

$$\text{temps opérationnel net} = \text{TP} \times \text{pourcentage de performance}$$

Puis le TP est calculé à partir du TON :

$$\text{temps productif} = \text{TON} \times \text{pourcentage de qualité}$$

Afin de paramétrer le modèle, nous avons besoin des temps d'indisponibilités. Le temps d'indisponibilité total est :

$$\text{temps d'indisponibilité} = \text{TPP} - \text{TO}$$

Ce temps est réparti selon le temps d'indisponibilité dû aux pannes, aux set-up et autres causes d'inactivités. Nous fixons à 10% les pourcentages des deux premières indisponibilités pour une classe A puis respectivement 20%, 30%, 40% pour les classes B, C et D.

$$\text{temps de panne} = \text{temps de set up} = \text{pourcentage} * \text{temps d'indisponibilité}$$

$$\text{temps d'indisponibilités autres} = (1 - 2 \times \text{pourcentage}) * \text{temps d'indisponibilité}$$

Le tableau ci-dessous récapitule les données chiffrées nécessaires à ces calculs :

classe	A	B	C	D
% pertes		5%	10%	20%
TRS	85%	73%	62%	44%
disponibilité	90%	86%	81%	72%
% pannes	10%	20%	30%	40%
% set-up	10%	20%	30%	40%
% autres	80%	60%	40%	20%
performance	95%	90%	86%	76%
qualité	99%	95%	90%	80%

Tableau 11 : Exemples de TRS et de ses paramètres

A partir de ces données, nous obtenons les paramètres de simulation suivants :

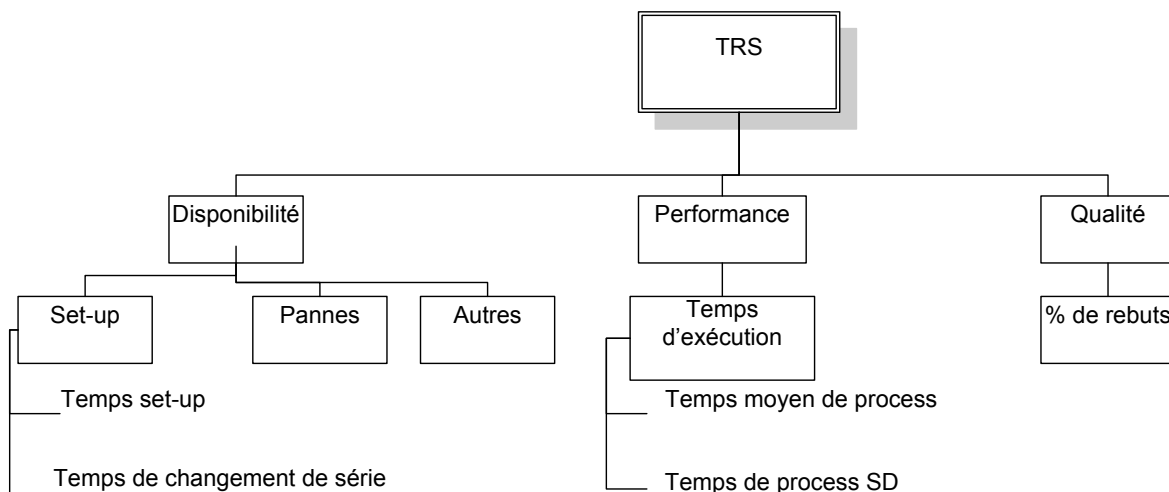


Figure 46 : Composantes du TRS

A partir temps total de pannes et de set-up explicités ci-avant, le nombre de lancements d'OF par jour et la fréquence de pannes, nous déduisons :

Evaluation des impacts simultanés de la localisation, de l'efficacité et du type de produits fabriqués sur les performances environnementales et financières d'une chaîne logistique

- Le Mean Time Between Failure (MTBF),
- Le Mean Time To Repair (MTTR),
- Le temps de set-up unitaire.

En majorant le temps de set-up, nous établissons le temps de changement de série qui est appliqué dans les cas où deux OF consécutifs concernent deux produits différents.

Pour les temps de process, nous avons besoin des cadences. Nous fixons la cadence.

$$cadence = nombre\ d'unités\ produites\ par\ minute = 0,1\ ppm$$

Puis, nous la corrigeons selon l'efficacité de l'entreprise. Pour les entreprises de type B, C et D, la cadence corrigée tient compte d'heures supplémentaires nécessaires.

$$cadence\ corrigée\ (A) = cadence \times TRS$$

$$cadence\ corrigée\ (k) = cadence \times TRS \times \frac{temps\ productif\ (A)}{temps\ productif\ (k)}\ avec\ k = B, C, D$$

Nous pouvons alors calculer les temps moyens suivants :

$$temps\ de\ process\ moyen\ goulot = \frac{1}{cadence \times 60}$$

$$temps\ de\ process\ moyen\ non\ goulot = (1 - 20\%) \times temps\ de\ process\ moyen\ goulot$$

$$temps\ de\ set\ up\ unitaire = \frac{temps\ set\ up}{nombre\ de\ lancement}$$

$$temps\ de\ changement\ de\ série = (1 + 10\%) \times temps\ de\ set\ up$$

$$temps\ de\ manutention = 10\% \times temps\ de\ process\ moyen\ goulot$$

Tous les pourcentages utilisés dans ces calculs sont fixés et identiques selon les classes. Les valeurs numériques sont synthétisées dans le tableau ci-dessous.

Classe d'entreprise ==>	A	B	C	D
TRS	85%	74%	63%	44%
Disponibilité	90%	86%	81%	72%
Allure	95%	90%	86%	76%
Qualité	99%	95%	90%	80%
% Indispo pannes	10%	20%	30%	40%
% Indispo set up	10%	20%	30%	40%
% Indispo autre	80%	60%	40%	20%

Cadence [ppm]	0.100	0.100	0.100	0.100
Temps d'ouverture [h]	10			

	A	B	C	D
temps productif	8.46	7.35	6.27	4.38
temps opérationnel net	8.55	7.74	6.97	5.47
temps opérationnel	9.00	8.60	8.10	7.20
temps d'indisponibilité	1.00	1.40	1.90	2.80

Temps de pannes	0.100	0.280	0.570	1.120
Temps set up	0.100	0.280	0.570	1.120
Temps indispo autre	0.800	0.840	0.760	0.560

MTBF	200.00	100.00	80.00	60.00
MTTR	2.00	2.80	4.56	6.72

Cadence corrigée [ppm]	0.10	0.10	0.12	0.15
Temps process moyen goulot [h]	0.175	0.161	0.144	0.113
Excédent relatif non-goulot	20%	20%	20%	20%
Temps process moyen non- goulot	0.140	0.129	0.115	0.091
Nombre de lancement par jour (min)	4	4	4	2
Temps set up unitaire	0.029	0.070	0.143	0.560
Excédent relatif de temps de changement de produit	10%	10%	10%	10%
Temps de changement de produit	0.031	0.077	0.157	0.616
Rapport du temps de manutention sur le temps de process	10%	10%	10%	10%
Temps de manutention (reception, livraison)	0.018	0.016	0.014	0.011

Tableau 12 : Feuille de calcul des temps de process (Essaïd M., 2008)

I.6.2 Paramètres de transport

De même que les modules d'entreprise, les modules de transport nécessitent des paramètres.

Nous avons donc défini quatre localisations : locale, régionale, continentale et globale. Les données nécessaires à leur configuration sont synthétisées ci-dessous :

numéro de la configuration	localisation	mode de transport	nombre de km	temps de transport en heures	fréquence en heures
1	TEMOIN	0	0	0	0
2	LOCALE	CAMION	50	4	4
3	REGIONALE	CAMION	500	8	8
4	CONTINENTALE	CAMION	1500	40	20
5	CONTINENTALE	AVION	1500	8	8
6	GLOBALE	BATEAU	8000	240	40
7	GLOBALE	AVION	8000	8	8

Pour assurer notre choix du taux de service de 100%, nous avons configuré des transports express pour les configurations continentale et globale. Si la livraison normale doit arriver en retard par le moyen de transport habituel, la cargaison prendra l'avion.

Tableau 13 : Données de transport

I.6.3 Paramètres des produits

Nous avons ordonné les produits en quatre classes selon les attributs suivants : lourd/léger, encombrant/non encombrant (figure 47) car les émissions de dioxyde de carbone dépendent du poids transporté et de l'encombrement de stockage. Le produit léger non encombrant est représenté par un thermostat, le lourd non encombrant par un compresseur, le léger

encombrant par un SPA et le lourd encombrant par un chiller¹⁰. Ce choix est défini pour l'ensemble de la chaîne logistique :

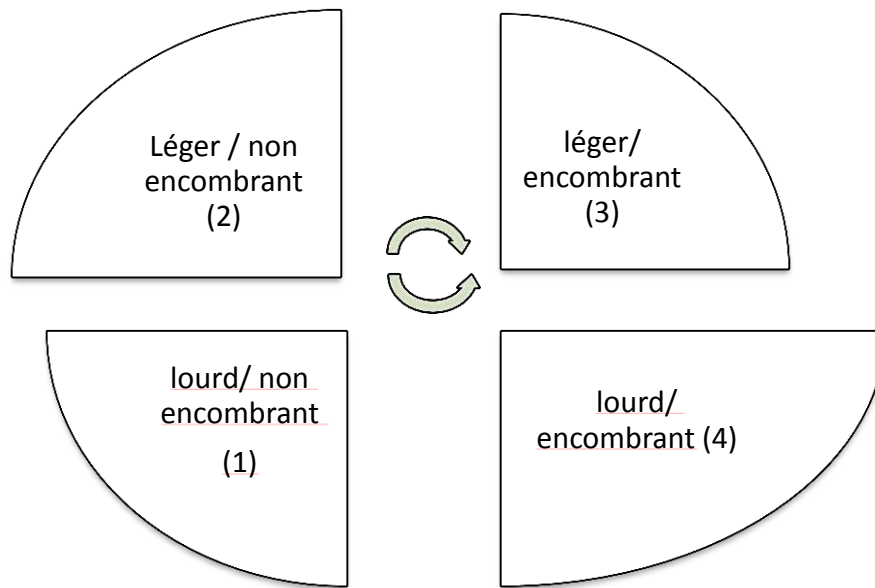


Figure 47 : Type de produits

Les données des produits 1, 2 et 4 proviennent de l'entreprise Carrier. Depuis 1993, Carrier (groupe UTC), un fabricant de climatiseurs, s'est employé à réduire son empreinte écologique. En 2003, l'Agence Américaine pour la Protection de l'Environnement l'a reconnu comme leader dans la protection environnementale. Il fabrique des produits innovants en travaillant sur la diminution de consommation d'eau et d'énergie. Il tente à présent pour comprendre la complexité des liens entre les indicateurs industriels (principalement stocks et délais) et l'impact environnemental d'une gestion quotidienne. Les données du produit 3 sont issues de l'industrie plasturgique.

Les hypothèses suivantes ont été retenues pour calculer l'encombrement au sol des produits. Il n'est pas possible d'empiler des produits de type 3 et 4 donc leur dimension en m² correspondent à leur encombrement au sol. Pour les autres produits, des racks de cinq mètres de hauteur sont utilisés. Le nombre de produits stockables sur une telle hauteur est estimé et nous déterminons ainsi la surface au sol nécessaire pour un produit (figure 48).

¹⁰ chiller : groupe d'eau glacée ou refroidisseur de liquide

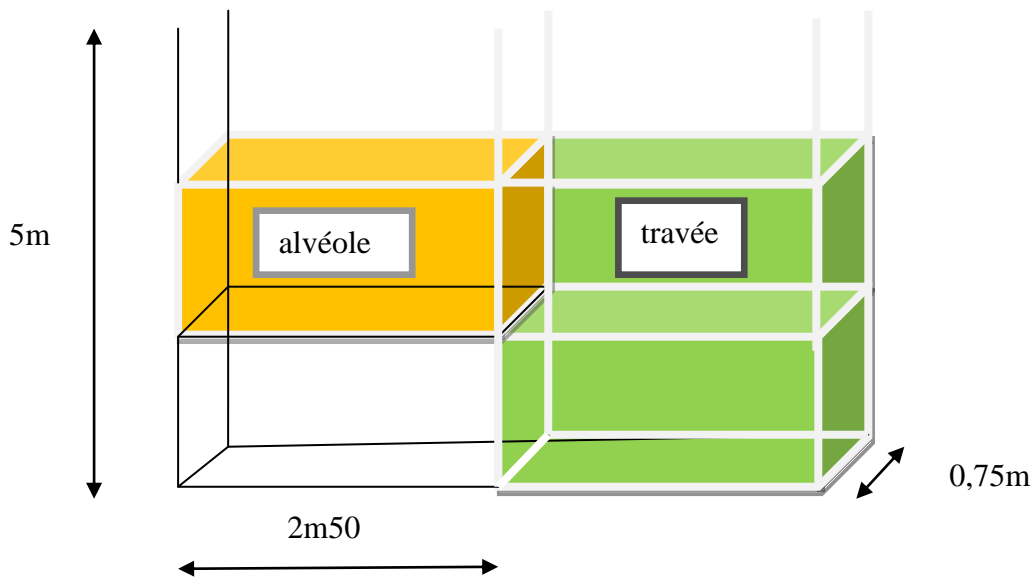


Figure 48 : descriptif d'un rack

Dans le hangar de stockage, les allées et passages représentent 60% de la surface de stockage afin de laisser circuler les engins de manutention.

Les paramètres qui caractérisent ces produits dans le cadre de la simulation sont synthétisés dans les tableaux 14 à 17.

secteur	mécanique
référence	Compresseur
Numéro du produit	1
Poids en tonnes	0.288
Longueur en m	0.84
Largeur en m	0.64
Encombrement en m ²	0.54
Hauteur en m	0.64
Nombre moyen de produits en hauteur	8
Encombrement moyen au sol pour un produit en m ² (40% de l'aire totale)	0.0688
Aire des allées en m ² (60% de l'aire totale)	0.1032
Aire totale en m ² pour un produit	0.1720
densité (tonne/m ³)	0.84

Tableau 14 : Paramètres du produit 1

secteur	électronique
référence	Thermostat
Numéro du produit	2
Poids en tonnes	0.0000055

Longueur en m	0.1524
Largeur en m	0.1016
Encombrement en m²	0.0155
Hauteur en m	0.0051
Nombre moyen de produits en hauteur	980
Encombrement moyen au sol pour un produit en m² (40% de l'aire totale)	0.000016
Aire des allées en m² (60% de l'aire totale)	0.000024
Aire totale en m² pour un produit	0.000039
densité (tonne/m³)	0.07

Tableau 15 : Paramètres du produit 2

secteur	plastique
référence	SPA
Numéro du produit	3
Poids en tonnes	0.45
Longueur en m	2.2
Largeur en m	2.3
Encombrement en m²	5.0600
Hauteur en m	0.95
Nombre moyen de produits en hauteur	1
Encombrement moyen au sol pour un produit en m² (40% de l'aire totale)	5.0600
Aire des allées en m² (60% de l'aire totale)	7.5900
Aire totale en m² pour un produit	12.650000
densité (tonne/m³)	0.09

Tableau 16: Paramètres du produit 3

Secteur	mécanique
Référence	Chiller
Numéro du produit	4
Poids en tonnes	8.44
Longueur en m	9.57
Largeur en m	2.25
Encombrement en m²	21.5325
Hauteur en m	2
Nombre moyen de produits en hauteur	1
Encombrement moyen au sol pour un produit en m² (40% de l'aire totale)	21.5325
Aire des allées en m² (60% de l'aire totale)	32.2988
Aire totale en m² pour un produit	53.831250
densité (tonne/m³)	0.20

Tableau 17 : Paramètres du produit 4

Pour implémenter le modèle, nous avons également besoin des taux d'émissions de dioxyde carbone du stockage et du transport pour les quatre types de produits.

I.6.4 Facteurs d'émissions d'équivalent de dioxyde de carbone

Afin de calculer les émissions de carbone de la chaîne logistique, nous utilisons des facteurs d'émissions d'équivalent de dioxyde de carbone. Toutes les données de ce paragraphe proviennent de l'ADEME.

Pour le tableau 18, on notera que les camions utilisés pour les destinations locales sont plus petits que pour les destinations régionales ou continentales. Par conséquent les émissions par tonne.km d'équivalent CO₂ sont plus importantes dans le premier cas. Pour les transports par avion, le décollage et l'atterrissage sont plus émetteurs d'équivalent CO₂ d'où les émissions par km plus élevées pour les moyens que pour les longs courriers. Pour les transports en bateau, le facteur d'émissions dépend de la densité du produit et est différent selon les quatre types de produits choisis. Le facteur d'émissions du stockage représente l'empreinte carbone en kgCO₂ par m² de la construction d'un hangar de stockage.

Transport/ stockage	gCO₂ équivalent par tonne.km ou par m² (incertitude)
Local (l)	145,10 (10%)
Regional (r) ou Continental (c)	74,90 (10%)
Global (g)	
Produit 1	3,57(10%)
Produit 2	42,86(10%)
Produit 3	33,33(10%)
Produit 4	13,64(10%)
Express continental	570 (20%)
Express global	320 (20%)
Hangar industriel	75 000 (50%)

Tableau 18 : Facteurs d'émissions en gCO₂ équivalent

Un compteur de kilomètres par mode de transport et un compteur de poids de produits transportés permet de connaître le nombre total de kilomètres de la chaîne logistique et ainsi de connaître les émissions dues au transport :

$$\begin{aligned} \text{émissions dues au transport en gCO}_2 \text{ équivalent} \\ &= \text{nombre de kilomètres} \times \text{poids de produits transportés} \\ &\times \text{facteur d'émissions} \end{aligned}$$

Chaque stock maximal de produits de chaque entreprise permet de calculer les émissions dues au stockage :

$$\text{émissions dues au stockage en gCO}_2 \text{ équivalent} = \text{m}^2 \text{ de stockage} \times \text{facteur d'émissions}$$

Une fois, le modèle implémenté, il doit être calibré.