



MINI-PROJET en Matlab/Simulink

Option : Génie industriel

Modélisation d'une chaîne d'approvisionnement sous Matlab/Simulink

Réalisé par :

ASSAD
HOUDA

ARIDAL SAMI
BOUJAMAOU
ELHOUCINE

En cadré par :

Prof. Dr. Imad EL HARRAKI

05 MARS 2021
ANNEE UNIVERSITAIRE 2020/2021

Table des matières

I. Justifiez et motivation du choix du sujet	2
1. Sujet	2
2. Motivation	2
II. Introduction et description	3
III. Position du problème	4
1. Définition de Supply Chain Management	4
2. Prévvision de la demande :	4
3. Stock de Sécurité (Mesure de l'incertitude de l'erreur de prévision) :	6
4. Politiques de contrôle des stocks	8
a. Principales politiques de contrôle :	8
b. La (s, S) politique: “order-up-to-level”:	9
IV. Traitement du problème sous Matlab / Simulink	13
1. Prévvision de la demande (Demand Forecasting)	13
2. Contrôle des stocks (Stock Control Policy)	19
3. Chaîne dynamique d’approvisionnement (Supply Chain Dynamics)	23
4. Résultats de la simulation	26
V. Conclusion	29
VI. Référence	30

I. Justifiez et motivation du choix du sujet

1. Sujet

L'étude d'une chaîne d'approvisionnement tout en utilisant matlab / simulink pour visualiser ce phénomène en utilisant des bibliothèques et toolbox convenables. Cette étude va nous permettre de combiner entre MATLAB/SIMULINK et SUPPLY CHAIN MANAGEMENT SCM et de passer du théorique au pratique.

2. Motivation

En tant que des élèves ingénieurs en génie industriel, nous avons eu l'idée de choisir un sujet tout en mettant l'accent sur le domaine qui nous intéresse dans nos projets professionnels, d'où l'idée de découvrir les nouvelles possibilités que peut procurer MATLAB/SIMULINK dans la modélisation des SUPPLY CHAIN ou chaîne d'approvisionnement.

II. Introduction et description

L'objectif principal de ce mini-projet est de se familiariser avec des nouveaux TOOLBOX sur MATLAB/SIMULINK et surtout le toolbox Z-TRANSFORM vu que les fonctions utilisées sont discrètes (la demande les ventes) : block DELAY and block DESCRIPTION FILTER, quand va voir dans notre simulation et comprendre son utilisation, la notion z-transform est importante dans le domaine de traitement des signaux discrets donc elle est cruciale dans notre travail car les différent signaux modélisés seront mis en jeux dans des blocs en simulink cela pour introduire des notions comme les fonctions de transfert et appliquer les technique de régulation procurée par l'Automatique (Control Theory) pour réguler des chaîne d'approvisionnement complexe avec des modèles simple dans Simulink.

Ce sujet va nous permettre d'apprendre et mieux comprendre les notions sur Supply chain management et mieux visualiser les différentes relations existantes entre le stock, demande (Demand), commande (Order), l'expédition (Shipment), the Net Stock (NS), The Work In Process (WIP), The Inventory Position (IP), reorder point (s) ou lead time quantile forecast ainsi d'autre notion que on va découvrir au long de notre travail.

III. Position du problème

1. Définition de Supply Chain Management

Le Supply Chain Management définit l'ensemble des ressources, méthodes, outils et techniques, visant à obtenir une excellente performance globale dans une chaîne constituée d'entreprises indépendantes mais liées par un objectif commun : la satisfaction client final.

2. Prévision de la demande :

Le lissage exponentiel est la plus utilisée de toutes les techniques de prévision. Il fait partie intégrante de pratiquement tous les programmes de prévision informatisés, et il est largement utilisé pour commander des stocks dans les entreprises de détail, les entreprises de gros et les agences de services.

Les techniques de lissage exponentiel très utiles pour plusieurs raisons ; ils sont étonnamment précis, leur formulation est relativement facile, fonctionnement du modèle est facilement compréhensibles, peu de calculs sont nécessaires pour utiliser le modèle, les besoins en matière de stockage numérique sont faibles en raison de l'utilisation limitée des données historiques. Dans la méthode de lissage exponentiel, seules trois données sont nécessaires pour prévoir l'avenir : la prévision la plus récente, la demande réelle qui s'est produite pour cette période de prévision, et une constante de lissage alpha (α). Cette constante de lissage détermine le niveau de lissage et la vitesse de réaction aux différences entre les prévisions et les occurrences réelles. La

valeur de la constante est déterminée à la fois par la nature du produit et par le sens de ce qui constitue un bon taux de réponse pour le gestionnaire. Par exemple, si une entreprise produit un article standard dont la demande est relativement stable, le taux de réaction aux différences entre la demande réelle et la demande prévue aura tendance à être faible, peut-être seulement 5 ou 10 points de pourcentage. Toutefois, si l'entreprise connaît une croissance, il serait souhaitable d'avoir un taux de réaction plus élevé, peut-être 15 à 30 points de pourcentage, pour donner plus d'importance à l'expérience de croissance récente. Plus la croissance est importante, plus le taux de réaction doit être élevé. L'équation de prévision à lissage exponentiel simple est simplement :

$$F_t = F_{t-1} + \alpha(A_{t-1} - F_{t-1})$$

Cette équation indique que la nouvelle prévision est égale à l'ancienne prévision plus une partie de l'erreur (la différence entre la prévision précédente et ce qui s'est réellement produit).

Où :

- F_t : La prévision exponentiellement lissée pour la période t
- F_{t-1} : La prévision exponentiellement lissée pour la période précédente
- A_{t-1} : La demande réelle au cours de la période précédente
- α : Le taux de réponse souhaité, ou constante de lissage

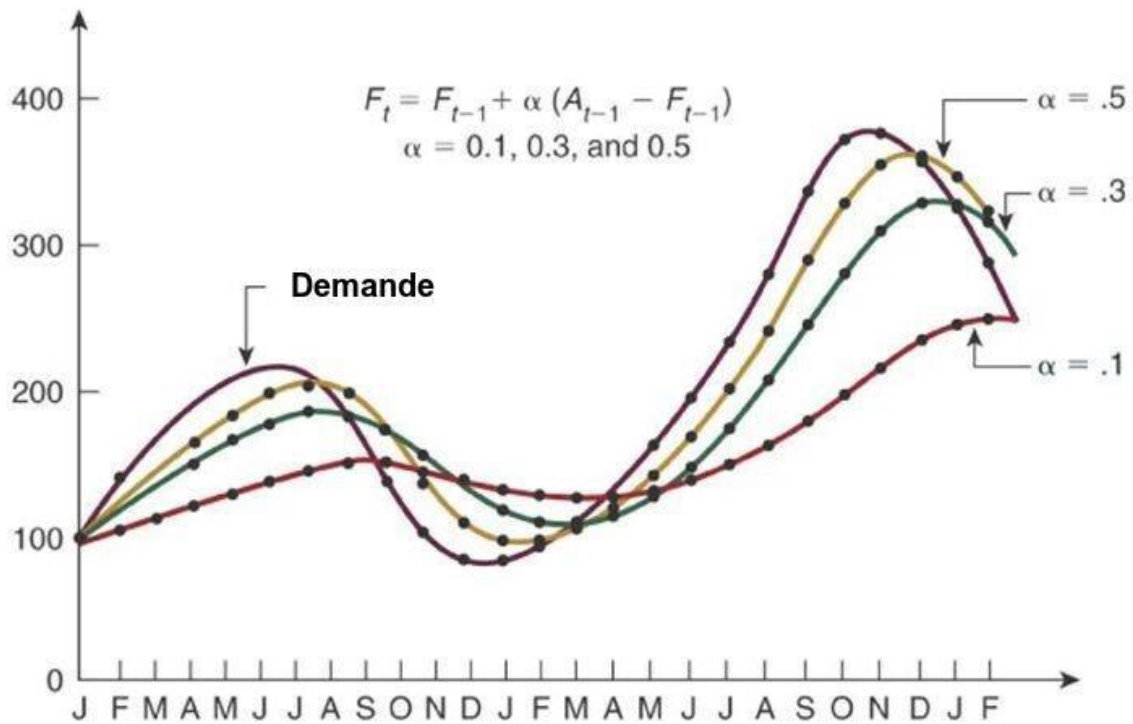


Figure 1: L'effet de la valeur du lissage exponentielle sur le calcul des prévisions

3. Stock de Sécurité (Mesure de l'incertitude de l'erreur de prévision) :

L'erreur de prévision de la demande est un iid gaussien avec une moyenne nulle et une variance constante, le stock de sécurité (SS), pour un niveau de service du cycle cible (CSL), exprimé comme la probabilité cible d'absence de rupture de stock sur le délai, peut être calculé comme :

$$SS = k\sigma_L$$

Où $k = \Phi^{-1}(\text{CSL})$ est le facteur de sécurité ; $\Phi(-)$ désigne la fonction de distribution cumulative normale standard ; et σ_L représente l'écart-type de l'erreur de prévision pour un certain délai L que l'on suppose constant et connu.

Le principal défi est d'estimer σ_L .

Il existe deux alternatives :

Une approche théorique et une approche empirique. En ce qui concerne l'option théorique, tout d'abord, une estimation de σ_1 (l'écart type d'un pas en avant de l'erreur de prévision) est fournie et, puisque le pas de mise à jour de la prévision est généralement plus petit que le délai, ensuite, une expression analytique qui met en relation σ_L et σ_1 est employée. La demande peut être modélisée comme un modèle au niveau local, c'est-à-dire un ETS(A,N,N) avec le paramètre α [REF] la variance conditionnelle pour la demande de délai est:

$$\sigma_L = \sigma_1 \cdot \sqrt{L} \cdot \sqrt{1 + \alpha \cdot (L - 1) + \frac{1}{6} \alpha^2 (L - 1)(2L - 1)}$$

En outre, σ_1 peut être estimé en appliquant un lissage exponentiel unique sur l'erreur quadratique moyenne (EQM), comme $\sigma_1 = \sqrt{MSE_{t+1}}$ et l'EQM est mise à jour comme suit au fur et à mesure que de nouvelles observations deviennent disponibles :

$$MSE_{t+1} = \alpha' \epsilon_t + (1 - \alpha') \cdot MSE_t$$

Où :

- $\epsilon_t = Y_t - F_t$,
- Y_t est la valeur réelle au moment t .
- F_t est la valeur prévue pour la même période.

Ou on peut utiliser une approche paramétrique empirique, auquel cas σ_L est estimé directement à partir de l'erreur de prévision du délai d'exécution comme :

$$\sigma_L = \sqrt{MSEL, t}$$

Et

$$MSEL, t = \gamma \epsilon_{L, t}^2 + (1 - \gamma)MSEL, t-1$$

Où :

$\epsilon_{L, t} = \sum_{i=t-l+1}^t (y_i - F_i)$ est l'erreur cumulée de prévision des délais.

4. Politiques de contrôle des stocks

a. Principales politiques de contrôle :

Les grandes politiques d'inventaire peuvent être classées en deux catégories :

✓ Politiques de révision continue :

- (s, S) : Le petit s indique le point de re-commande et le grand S est la commande jusqu'au niveau.
- (s, Q) : Le petit s indique le point de commande et le Q est la quantité de commande économique.

✓ Politiques d'examen périodique :

- (R, S) : R désigne la période de révision et le grand S est la commande jusqu'au niveau.
- (R, s, S) : R indique la période de révision, le petit s indique le point de re-commande et le grand S est la commande jusqu'au niveau.

b. La (s, S) politique: "order-up-to-level":

La politique en (s, S) politique est :

Commandez jusqu'à un niveau S (votre quantité commandée est donc $S - \text{Position de stock}$), chaque fois que votre position de stock descend en dessous de s (Point de re-commande). On l'appelle aussi système Min-max car la politique dit que vous pouvez commander un Max de S lorsque vous atteignez le min de s .

- **Order-Point, Order-Quantity (s, Q) Politique : Commander Q si $IP \leq s$**

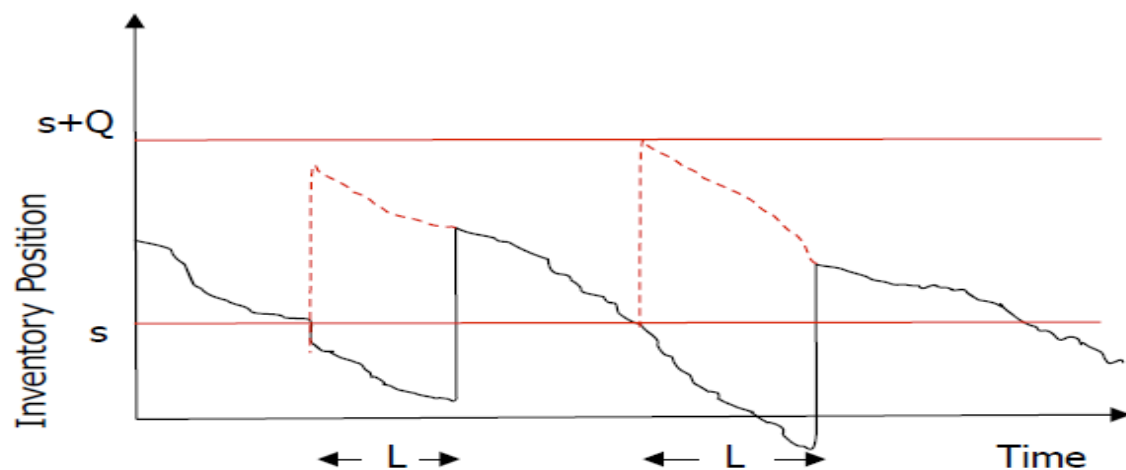


Diagramme globale de boucle causale pour la politique d'ordre-up-to basé sur des prévisions de lissage exponentiel :

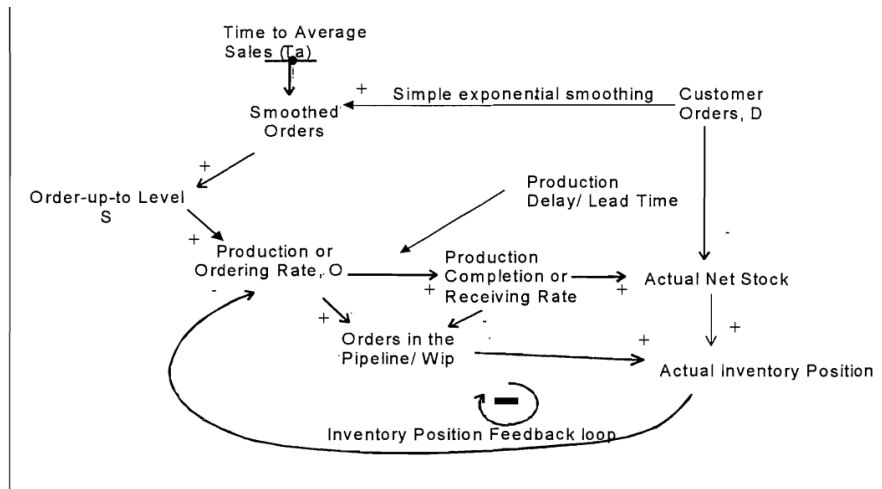


Figure 2: Causal loop diagram for the smoothing decision rule

La transformée en z est l'équivalent dans le domaine discret de la transformée de Laplace dans le domaine continu. L'utilisation principale de la transformée en z est pour le design de filtres numériques.

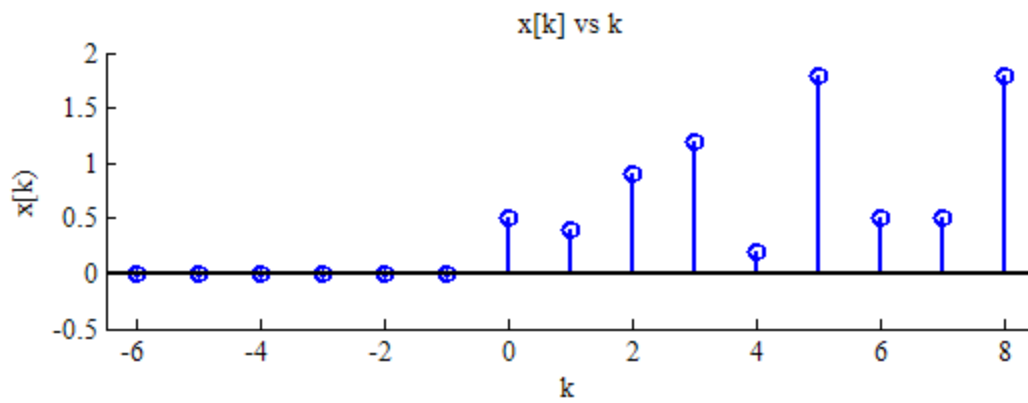
Sa définition mathématique est la suivante : la transformation en Z est une application qui transforme une suite s (définie sur les entiers) en une fonction S d'une variable complexe z , telle que :

$$S(z) = \mathcal{Z}\{s(n)\} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} s(n)z^{-n}, \quad z \in \left\{ z \in \mathbb{C} \mid \sum_{n=-\infty}^{+\infty} s(n)z^{-n} \text{ converge} \right\}$$

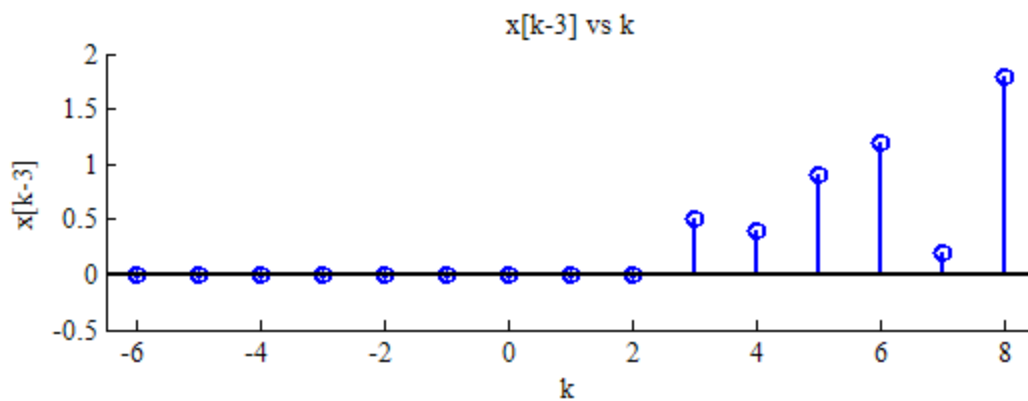
Propriété : (Retard 'Delay')

✓ Déplacement vers la droite (retard)

Considérons la fonction $x[k]$ illustrée ci-dessous, qui représente une séquence arbitraire.



Si nous déplaçons la fonction vers la droite de 3 intervalles, nous obtenons la fonction $x[k-3]$, illustrée ci-dessous.



En général, un retard de n échantillons entraîne une multiplication par z^{-n} dans le domaine z :

$$\mathcal{Z}(x[k-n]) = z^{-n}X(z)$$

Table de Transformées en z

$x(n)$	$X(z)$
$\delta(n)$	1
$\delta(n-i)$	z^{-i}
$u(n)$	$\frac{z}{z-1}$
$r(n)=nu(n)$	$\frac{z}{(z-1)^2}$
$n^2u(n)$	$\frac{z(z+1)}{(z-1)^3}$
$a^nu(n)$	$\frac{z}{z-a}$

Figure 3: Z-transforme

IV. Traitement du problème sous Matlab / Simulink

1. Prévion de la demande (Demand Forecasting)

La prévision de la demande est un élément de la modélisation de la Supply Chain, en particulier pour les entreprises où une telle prévision détermine la planification et le contrôle de la fabrication, alors, ici on va adapter la méthode « **Simple Exponential Smoothing (SES)** » : Est une méthode de prévision de séries chronologiques pour des données univariées sans tendance ni saisonnalité, Il nécessite un seul paramètre, appelé alpha (α) appelé “**Smoothing Coefficient**”.

Les résultats obtenus par la méthode **SES** sont calculées comme suit :

$$F_{t+1} = \alpha Y_t + (1 - \alpha).F_t \quad (1)$$

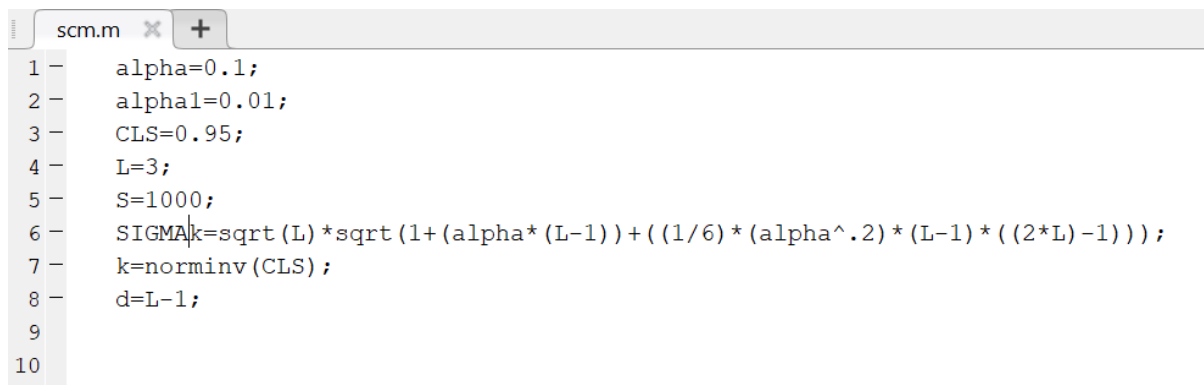
Et on utilise aussi l’outil mathématique « **Z-TRANSFORM** » : est un outil mathématique de l'automatique et du traitement du signal, qui est l'équivalent discret de la transformation de Laplace.

On utilise la formule :

$$F(t+1) = Z^{-1}.F(t)$$

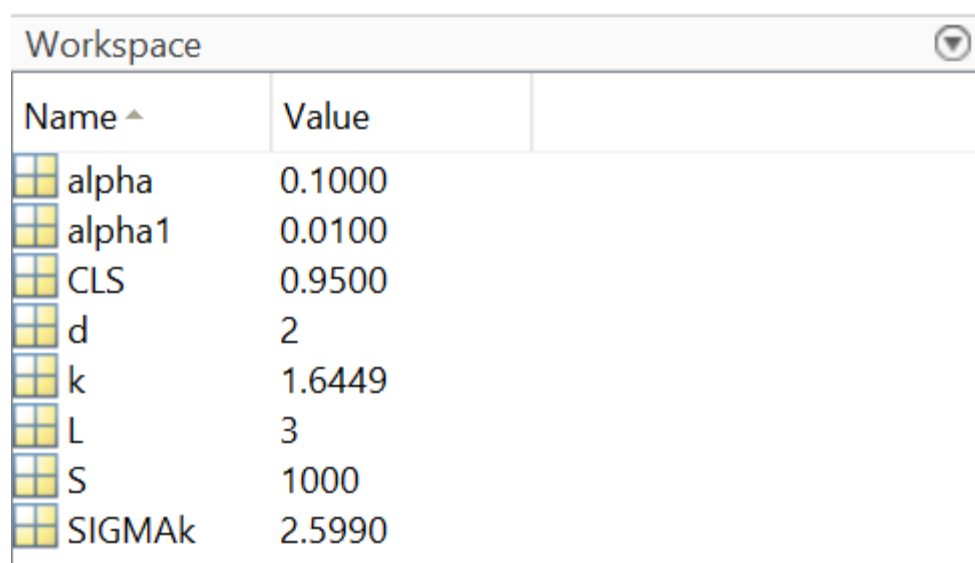
Avec Z^{-1} est l'opérateur de retard.

Pour la simulation on a choisi les variables définies sur notre fichier scm.m ‘document annexe’ :



```
1 - alpha=0.1;  
2 - alpha1=0.01;  
3 - CLS=0.95;  
4 - L=3;  
5 - S=1000;  
6 - SIGMAk=sqrt(L)*sqrt(1+(alpha*(L-1))+((1/6)*(alpha^.2)*(L-1)*((2*L)-1)));  
7 - k=norminv(CLS);  
8 - d=L-1;  
9  
10
```

Figure 4: les paramètres de la simulation



Name ▲	Value
alpha	0.1000
alpha1	0.0100
CLS	0.9500
d	2
k	1.6449
L	3
S	1000
SIGMAk	2.5990

Figure 5: WorkSpace de la simulation

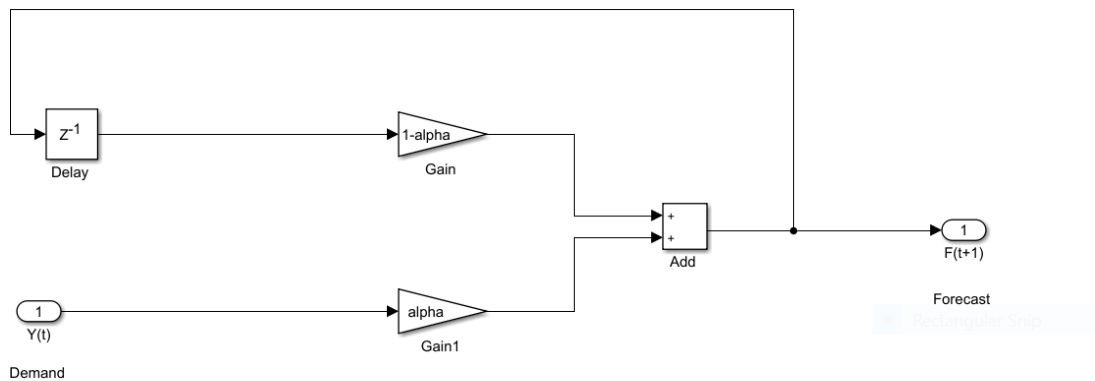


Figure 6: Bloc de la prévision de la demande

La figure 6 représente l'équation (1) tel que :

- $Y(t)$ représente la demande (Demand)
- $F(t+1)$ représente la prévision ou moyenne de prévision (mean forecast)
- α =alpha (sur le fichier annexe scm.m), Smoothing coefficient tel que α comprise entre 0 et 1.
- Z^{-1} c'est l'opération delay tel que $Z^{-1}=F(t)$, ce bloc nous permet de retarder l'entrée d'une durée donnée.



Figure 7: Subsystem SES

Dans le cas où l'étape de prévision est inférieure au délai, la prévision de la demande de délai est définie comme suit :

$$F_L = \sum_{i=1}^L F_{t+i} = L \cdot F_{t+1} \quad (2)$$

Souvent, l'étape de prévision est hebdomadaire et le délai d'exécution comprend plusieurs semaines.

De plus, en utilisant SES, on peut montrer que $F_{t+i} = F_{t+1}$ pour $i=1, 2, \dots, L$.

Tel que :

- L est le **Lead Time (délai)** : Le temps qui s'écoule entre le début et la fin d'un processus. (Variable connu)

MSE : (Mean Squared Errors ou Erreur quadratique moyenne)

Est une mesure caractérisant la 'précision' de cet estimateur. Elle est plus souvent appelée « Erreur quadratique » (moyenne étant sous-entendu) ; elle est parfois appelée aussi « *Risque quadratique* ».

Pour calculer l'Erreur quadratique on utilise la formule suivante :

$$MSE_t = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Y_t - F_t)^2 \quad (3)$$

Et pour déterminer l'erreur à l'instant (t+1) on applique la méthode **SES** a MSE(t), on aura alors :

$$MSE_{t+1} = \alpha' Y_t + (1 - \alpha') \cdot MSE_t \quad (4)$$

Et (4) est estimé par (5), l'écart type de l'erreur d'une longueur d'avance sur la prévision basée sur l'erreur quadratiques moyennes (MSE):

$$\sigma_1 = \sqrt{MSE_{t+1}} \quad (5)$$

Tel que σ_1 définit Variance de prévision ou variance forecast. D'où on définit la relation exacte entre les deux estimations σ_1 et σ_L :

$$\sigma_L = \sigma_1 \cdot \sqrt{L} \cdot \sqrt{1 + \alpha \cdot (L - 1) + \frac{1}{6} \alpha^2 (L - 1)(2L - 1)} \quad (6)$$

Certaines politiques de contrôle des stocks peut exiger une mesure d'incertitude de l'erreur de prévision à partir du système de prévision pour calculer le stock de sécurité (the safety stock), si les prévisions les erreurs sont indépendantes et réparties de manière identique, le stock de sécurité (SS) pour le taux de service cyclique cibler peut être exprimé comme suit :

$$SS = k \sigma_L \quad (7)$$

Avec k est nommée le facteur de sécurité (the safety factor), est défini comme le suivant :

$$K = \Phi(CSL) \quad (8)$$

Tel que :

- $\Phi(\cdot)$ fonction de la loi normal définie sur matlab par la syntaxe '`normpdf(.)`', the standard normal cumulative distribution function
- L'inverse de $\Phi(\cdot)$ c'est $\Phi^{-1}(\cdot)$ définie sur matlab par la syntaxe

`'norminv(.)'`, inverse of the standard normal cumulative distribution function, donc safety factor on l'appel sur matlab par la syntaxe `'k=norminv(CLS)'`

Où CLS c'est Cycle service level ou taux de service (cyclique) :

Cela correspond à la probabilité attendue de ne pas être en rupture de stock pendant le prochain cycle de réapprovisionnement et, ainsi, correspond également à la probabilité de ne pas rater de ventes.

Et le délai de prévision de la demande (lead time demand quantile forecast) est définie par :

$$s = F_L + SS = F_L + k\sigma_L \quad (9)$$

s est nommée aussi point de commande ou reorder point.

Suit à la définition de ces notions de Supply chaine relative aux stocks et prévisions ci-dessus on peut définir la simulation suivant sur Matlab/SIMULINK :

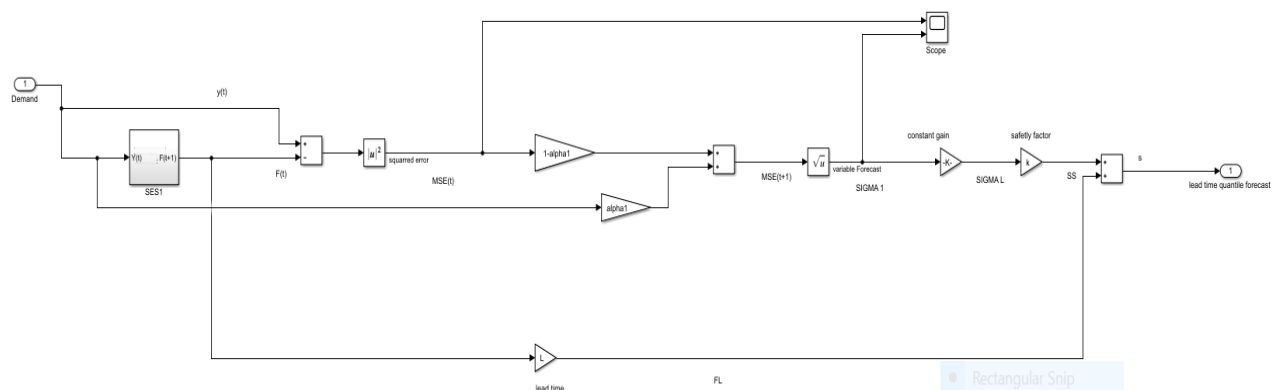


Figure 8: Bloc du Système de prévision avec délai SES -Forecast system with lead time

Tel que sur le fichier annexe scm.m :

- Constant gain est définie par **SIGMAK**= $\frac{\sigma_L}{\sigma_1}$
- α' =alpha1

On peut représenter cette simulation sous forme de subsysteme suivant :

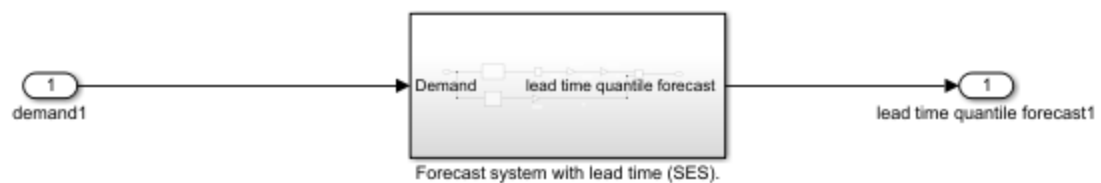


Figure 9: Subsystem

2. Contrôle des stocks (Stock Control Policy)

La commande (Order) est définie par la formule suivant :

$$\mathbf{O_t = S - IP_t} \quad (10)$$

Tel que :

- S est le niveau de commande (the order-up-to-level), c'est une variable connue ou on peut définir sa valeur sur le fichier scm.m (fichier annexe).
- IP (The Inventory Position) : le montant de l'inventaire disponible plus le montant de l'inventaire sur commande

$$\mathbf{IP =WIP+NS} \quad (11)$$

- WIP (The Work In Process): Chantier en cours: désigne un travail en cours, non terminé et ayant requis un investissement

$$WIP = \frac{1}{1-Z^{-1}} \times (\text{order-shipments}) \quad (12)$$

Avec shipments c'est expedition

- NS(The net stock) : Le stock net de capital représente la valeur cumulée des investissements antérieurs moins la consommation de capital fixe cumulée. Il est égal à la valeur financière du stock brut de capital

$$NS = \frac{1}{1-Z^{-1}} \times (\text{shipment-demande}) \quad (13)$$

Suit aux fonctions définies ci-dessus on a pu assurer la simulation suivante :

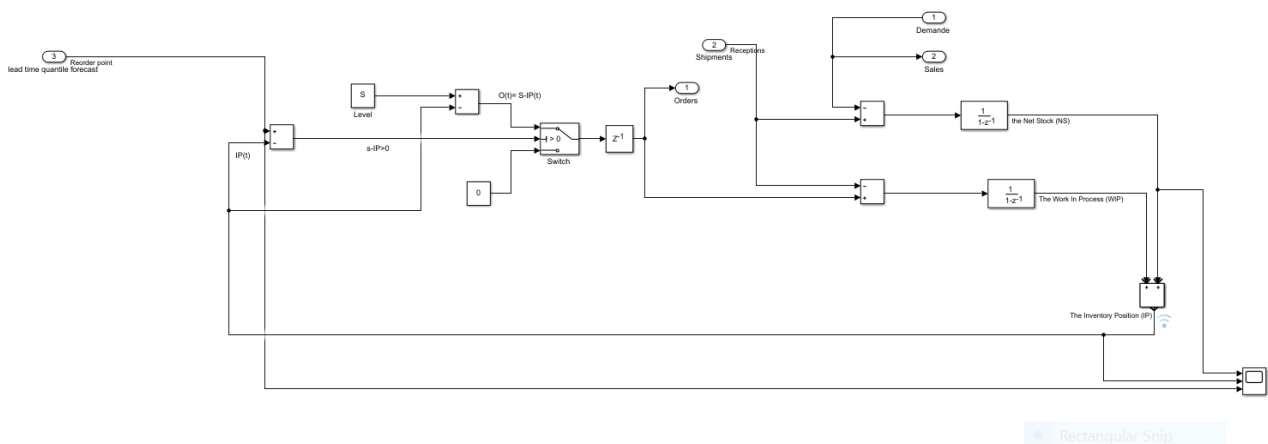


Figure 10: Figure 10: Block du diagram contrôle de stock (s,S)-diagram of the stock control system (s, S)

Dans le bloc de la figure 10 on a trois inputs et 2 outputs tel que :

- Les inputs sont : (1) Demand $y(t)$ (demande) ; (2) Shipments (l'expéditions) ; (3) Lead time quantile forecasts (Point de commande)
- Les outputs sont : (1) Orders $O(t)$ (Commande) ; (2) Sales (ventes)

Et on a utilisé avant la sortie de NS ET WIP un Bloc Discrete Filter de forme pour avoir des signaux causals, la transformée en Z est utile dans la bibliothèque SCM en simulink pour relier entre les paramètres associés à NS et WIP.

Le fonctionnement du bloc SWITCH il est lié directement au constraint sur IP :

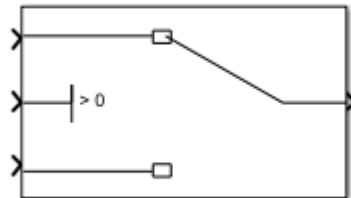


Figure 11: Block Switch

- Tel que la condition du passage est :
 $S = O(t) - IP(t)$, avec $s > IP$ (IP est inférieure à au point de commande) et bloc si l'entrée est nulle

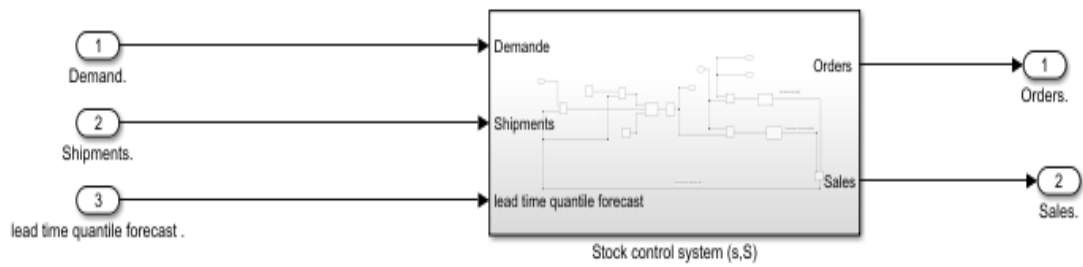


Figure 12: Subsysteme de (s,S)

Suit à la figure 9 et 12 on peut définir le sous-système suivant :

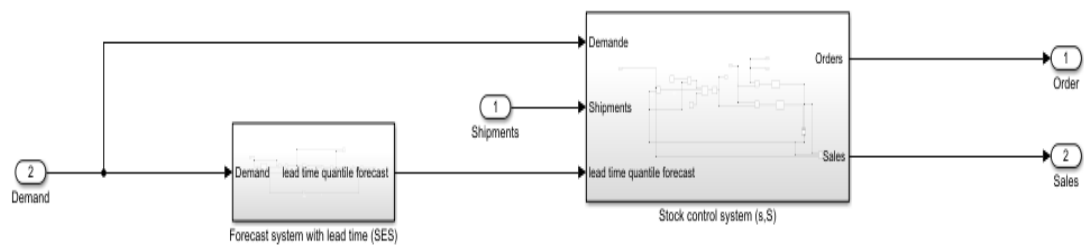


Figure 13: Bloc du Détaillant (retailer) qui utilise respectivement SES et (s, S) comme technique de prévision et contrôle des stocks

3. Chaîne dynamique d'approvisionnement (Supply Chain Dynamics)

Dans les parties précédentes, nous avons expliqué les liens entre le système de prévision et le contrôle des stocks. Dans cette partie, nous utiliserons ces blocs pour simuler une Supply Chain composée d'un Retailer et d'une Production (Manufacturer).

Pour simuler la Supply Chain, nous devons connecter ces entrées / sorties avec le reste des échelons.

Le premier bloc est Market qui génère la demande et reçoit des Sales (ventes) du Retailer (détaillant), où la demande est générée d'une manière aléatoire, et on peut bien les modifier par un fichier avec des données de demande.

La Production (Manufacturer) suit la même structure que le Retailer avec deux légères différences. Étant donné que le fabricant ne commande pas aux membres de la Supply Chain en amont, ce sous-système n'a pas de sortie de commandes. Néanmoins, il faut un certain temps pour produire les marchandises commandées par le Retailer Figure(14).

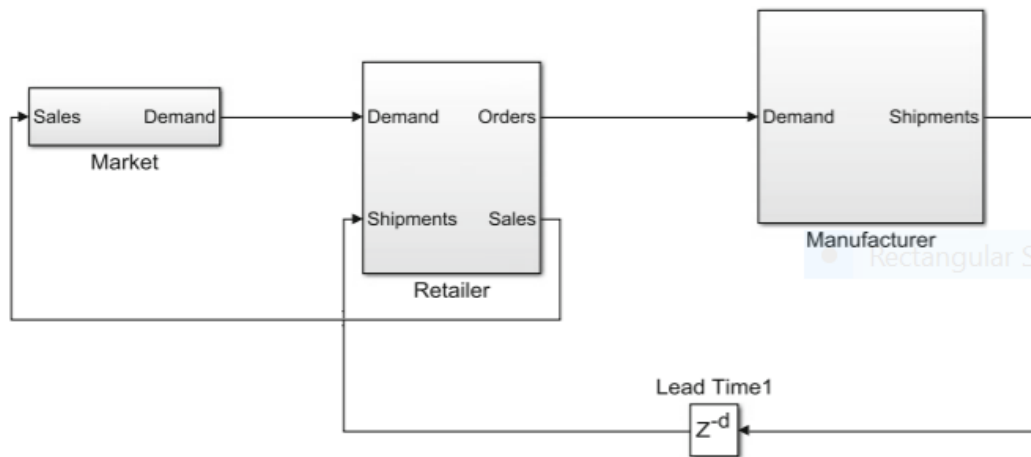


Figure 14: Exemple de chaîne d'approvisionnement avec deux membres connectés en série

Sur la figure 14 on réalise un nouveau bloc delay Z^{-d} c'est un bloc qui nous permet de définir le délai de production (Manufacturing time).

Tel que :

- d : le délai de fabrication est définie par $d=L-1$ (connu) avec L est le lead time .



Figure 15: Market subsystem

Et d'après la figure 13 et 15 on peut obtenir la simulation finale :

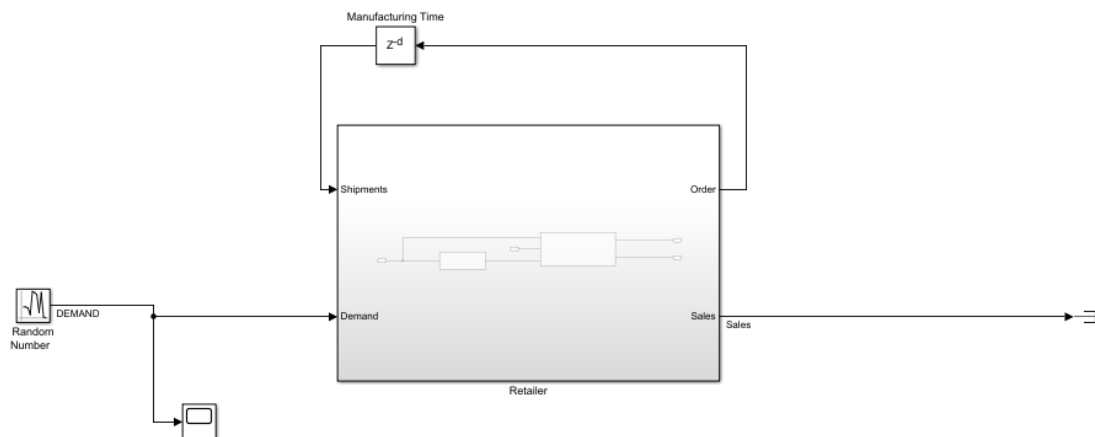


Figure 16: Block retailer for the manufacturer

Suite à notre simulation, on prend Random Number comme entrée avec une variance 20 et une moyenne (mean) 100, puis on installe quelques scopes pour visualiser la courbe de variation de quelques paramètres.

4. Résultats de la simulation

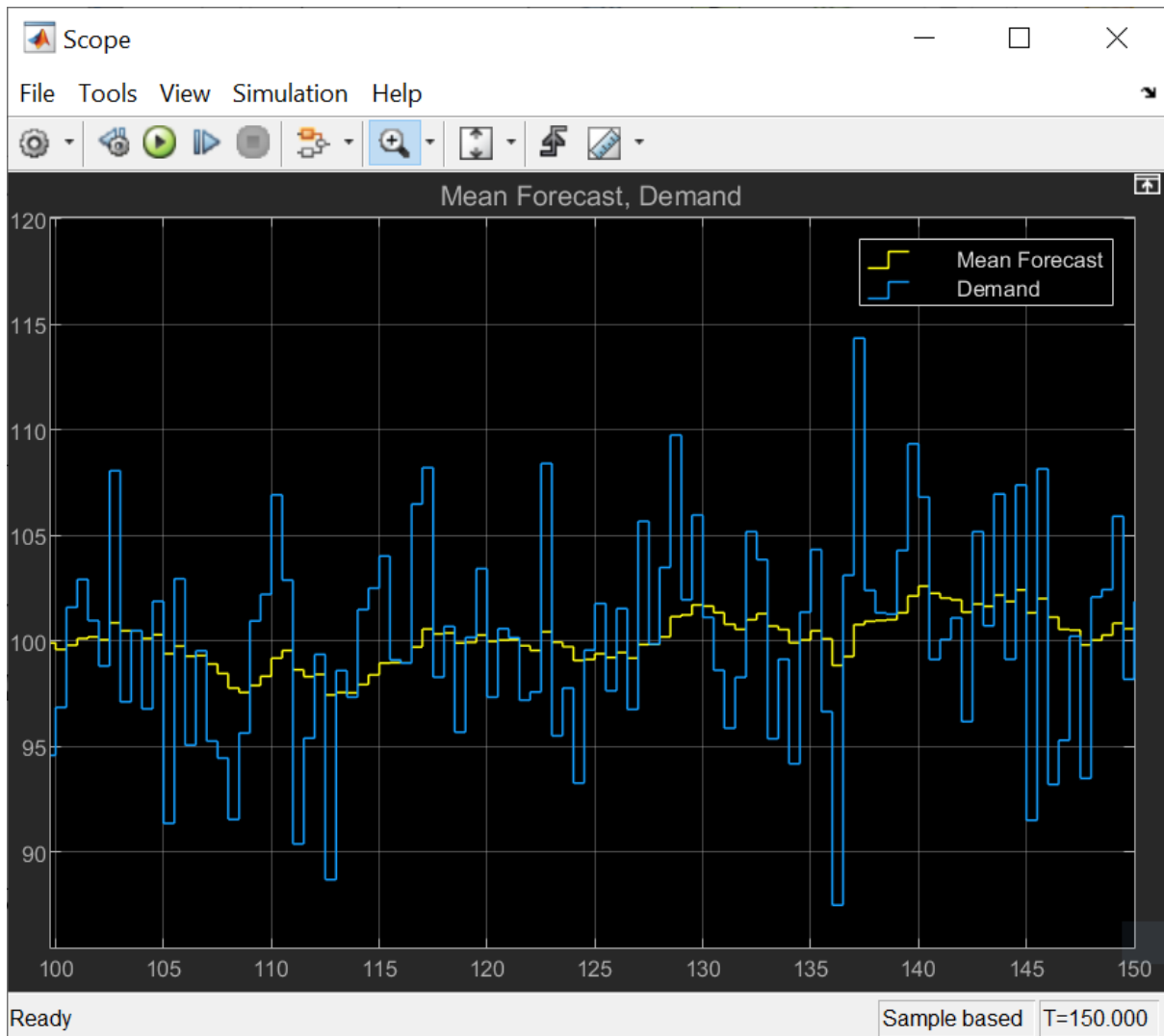


Figure 17: La variation de la demande $y(t)$ et de la moyenne de prévision $F(t+1)$

Le graphe qui visualise la prévision et la demande montre bien l'effet du coefficient alpha sur le lissage exponentiel, il est responsable de la vitesse de la réaction que data précédente dans la simulation en simulink alpha prend la valeur 0.1 ce qui signifie que la réponse choisie est très lente une telle valeur n'a pas de sens si on ne sait pas vraiment de quel genre d'entreprise

car selon son type et le type de ses ventes on peut choisir la valeur de alpha covenant.

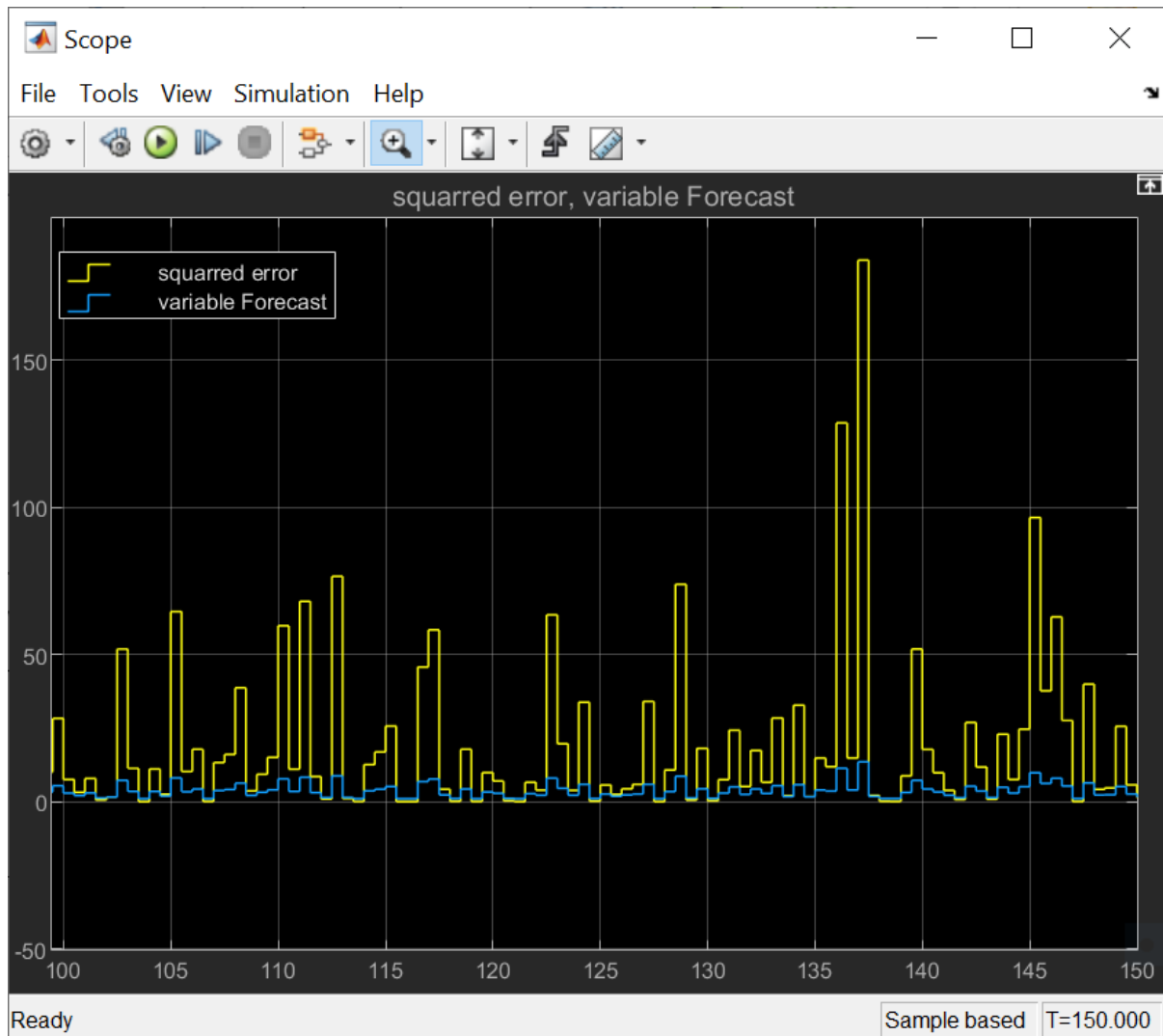


Figure 18: La variation de l'erreur quadratique moyenne MSE et de la variance de prévision

$$\sigma_1$$

Les résultats des prévisions des erreurs MSE, qui génère la valeur de l'intervalle du risque de stock et les lead time, sont aussi liée à la constante du lissage exponentiel.

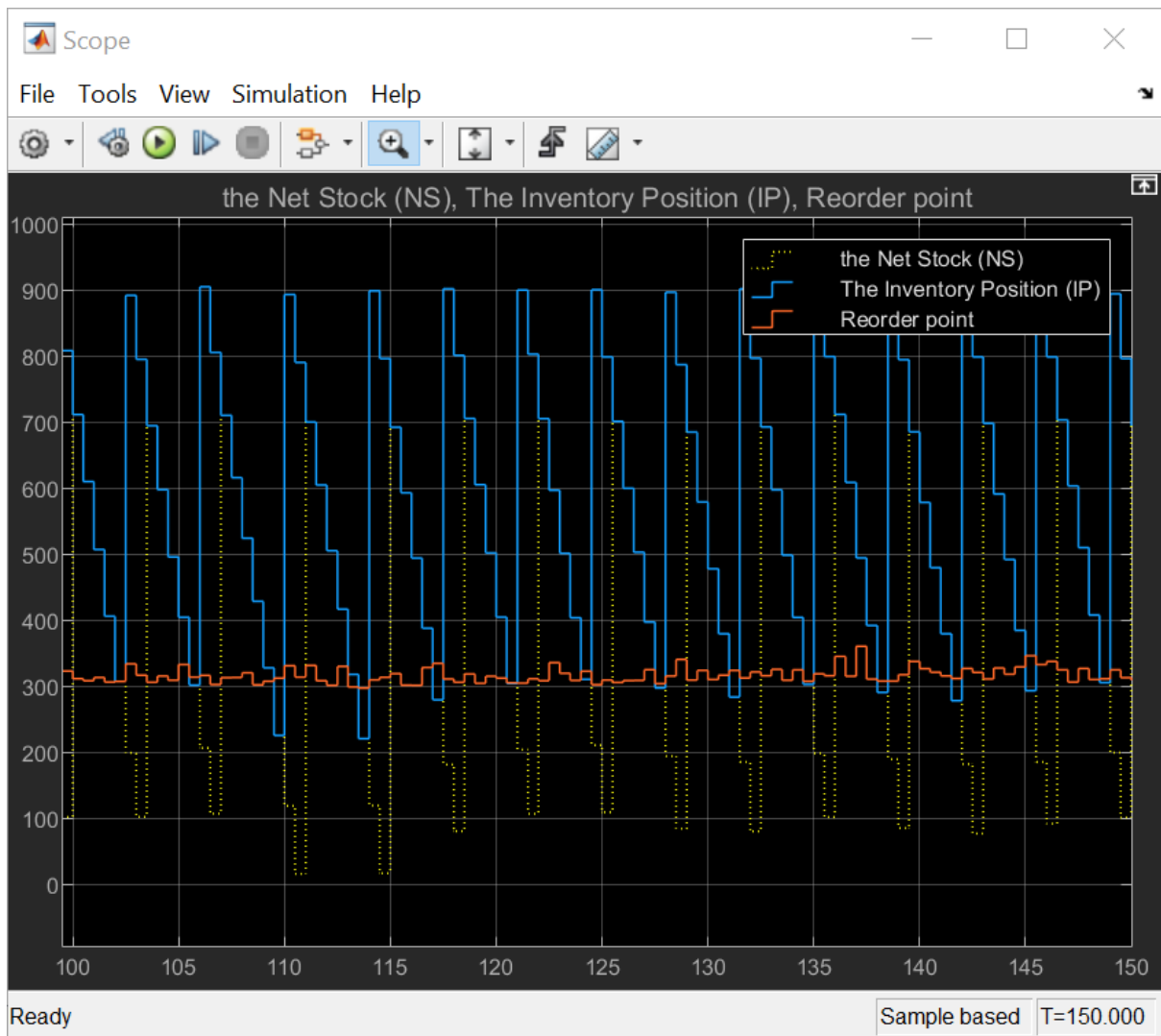


Figure 19: La variation du stock net NS, IP et point de commande

On remarque que le scope a bien illustré la politique de contrôle du stock à chaque fois que la quantité qu'on possède diminue au point de re-commande le stock est alimenté.

V. Conclusion

Ce travail a pour but d'utiliser l'outil de simulation simulink pour modéliser les chaînes d'approvisionnement par différentes possibilités que offre simulink , aussi de périmètres de fonder les différentes décisions au sein d'une supply sur des calculs de modèle précis et de mieux contrôler les différents paramètres et les aléas que peut rencontrer un tel système complexe , cela en serrant de la modélisation en bloc en simulink et appliquer les techniques de l'automatique en tant qu'outil qu'on peut qualifier d'outils d'optimisation en temps réel ,comme on est face à des quantités discrètes tel la demande ou les ventes simulink offre le toolbox z-transforme qui est équivalente à la transformée de Laplace pour les fonctions continues cela nous a permis de traiter ces différentes variables comme des signaux discrets et de représenter les équations en termes de fonction de transfert dans des blocs et de boucle pour réguler le système puis on a simulé les modèles réalisés et avoir des graphiques scope pour faire un diagnostic du fonctionnement de la chaîne d'approvisionnement et mesurer sa performance d'une manière plus précise .Aussi les résultats fournissent une vision claire sur le choix des différentes stratégies possibles et leurs influences sur le fonctionnement sur la supply chain et donc faire des décisions judicieuses .Ce travail a été l'occasion de traiter plusieurs concepts de plusieurs sujets très différents et voir le Supply chain management la régulation en automatique les modèles mathématiques prévision tout cela en un seul outil Matlab Simulink.

VI. Référence

- <https://otexts.com/fpp2/ets.html>
- Livre: Gestion de production ; auteurs: 'Alain Courtois', 'Maurice Pillet', 'Chantal Martin Bonnefous'; editions d'organisation;
- Research report 0108 measuring and avoiding the bullwhip effect: a control theoretic approach by j. Dejonckheere s.m. Disney m. Lambrecht d.r. Towill
- <https://www.google.com/amp/s/smartsupplychains.ai/2016/08/01/a-summary-of-commonly-used-inventory-policies/amp/>
- Data-Driven Remaining Useful Life Prognosis Techniques Syntetos et Boylan, 2006, 2008