

Cartes de contrôle CUSUM et EWMA

François Husson

Département statistique & informatique - Institut Agro

`francois.husson@institut-agro.fr`

Plan

- ① Introduction
- ② Définition de la carte CUSUM
- ③ Choix de la carte - comparaison avec la carte de Shewart
- ④ Améliorations possibles de la carte CUSUM
- ⑤ Estimation de la date et de l'amplitude du dérèglement
- ⑥ Présentation de la carte EWMA

Introduction

"Zéro défaut" n'existe pas en production

⇒ surveiller tout processus en contrôlant les objets fabriqués

2 types de contrôle :

- de réception
- en cours de fabrication

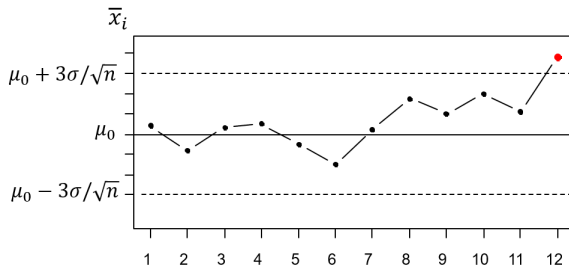
IDÉE SIMPLE : contrôler tous les objets mais

- pb de coût
- impossible si contrôle destructif
- inutile car c'est le processus qui est contrôlé

Carte de contrôle = signal d'alarme

Carte de Shewart

si $Processus \sim \mathcal{N}(\mu_0, \sigma)$, alarme si $\bar{x}_i > \mu_0 + 3\sigma/\sqrt{n}$ ou $\bar{x}_i < \mu_0 - 3\sigma/\sqrt{n}$



- simple
- décèle bien écarts brusques et importants
- détecte mal écarts petits et moyens (≈ 1 à 2σ)

Usure d'une machine \Rightarrow dérèglement lent et progressif

Détection rapide permet de réagir avant gros dérèglement

Comment détecter des dérèglages de petites ou moyennes amplitudes ?

Comment détecter des dérèglages de petites ou moyennes amplitudes ?

- augmenter la taille de l'échantillon prélevé à chaque contrôle

Pb : pas toujours possible :

- objets/unité de temps faible
 - mesure prend du temps
 - mesure coûte chère
- utiliser résultats du passé pour déceler dérive lente : règles des séries (analyse des structures de points sur la carte de Shewart).

Pb : hausse des fausses alarmes

Définition de la carte CUSUM

Conditions d'application : Idem carte de Shewart

Hypothèses :

- Mesures (ou moyennes de mesures) v.a. de même loi
- Variance du processus (σ^2) et valeur cible (μ_0) connues
- Lois des variables normales (sert pour calculer l'efficacité des cartes)

$$hyp \Rightarrow \left\{ \begin{array}{ll} E(x_i) = \mu_0 & , \quad V(x_i) = \sigma^2 \quad \text{avant dérèglement} \\ E(x_i) = \mu_0 + \Delta & , \quad V(x_i) = \sigma^2 \quad \text{après dérèglement} \end{array} \right.$$

Hypothèses = fiction, mais utile pour prendre des décisions

Construction de la carte

Notations : $\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_i$ moyennes de n résultats individuels successifs,

$$z_i = \sqrt{n} \frac{\bar{x}_i - \mu_0}{\sigma}$$

Si loi normale :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \bar{x}_i \sim \mathcal{N}(\mu_0, \frac{\sigma}{\sqrt{n}}) & \Rightarrow z_i \sim \mathcal{N}(0, 1) \text{ avant dérèglement} \\ \bar{x}_i \sim \mathcal{N}(\mu_0 + \Delta, \frac{\sigma}{\sqrt{n}}) & \Rightarrow z_i \sim \mathcal{N}(\delta = \frac{\Delta\sqrt{n}}{\sigma}, 1) \text{ après dérèglement} \end{array} \right.$$

Construction de la carte

Construction de 2 statistiques :

$$S_i^+ = \max \left(0, S_{i-1}^+ + (z_i - k) \right) \quad \text{avec } S_0^+ = 0$$

$$S_i^- = \min \left(0, S_{i-1}^- + (z_i + k) \right) \quad \text{avec } S_0^- = 0$$

Tant que S_i^+ et S_i^- entre h et $-h$ alors processus sous contrôle
sinon processus hors contrôle

Statistique S_i^+ détecte dérèglages positifs de la moyenne
 S_i^- détecte ses diminutions

k = coefficient de filtrage

Exemple

Valeur cible pour la moyenne $\mu_0 = 10$, écart-type $\sigma = \sqrt{2}$

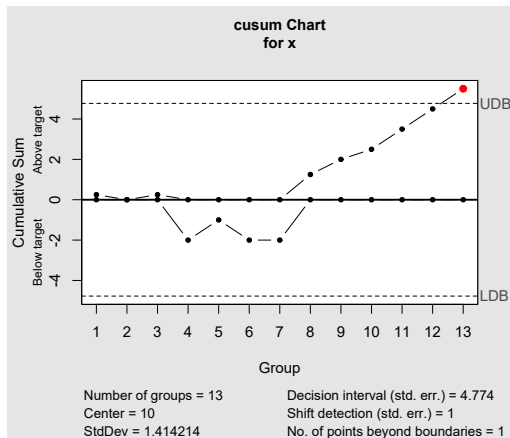
\bar{x}_i : moyenne de 2 observations successives

$k = 0.5$ et les limites de contrôle $h = 4.774$ (et $-h = -4.774$)

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{2}/\sqrt{2} = 1$$

Numéro du sous groupe i	x_{i1}	x_{i2}	\bar{x}_i	z_i	S_i^+	S_i^-	Alarme
0					0	0	
1	10.5	11.0	10.75	0.75	0.25	0	
2	10.0	9.0	9.50	-0.50	0	0	
3	11.5	10.0	10.75	0.75	0.25	0	
4	8.0	7.0	7.50	-2.50	0	-2	
5	9.5	11.5	10.50	0.50	0	-1	
6	8.0	9.0	8.50	-1.50	0	-2	
7	9.0	10.0	9.50	-0.50	0	-2	
8	11.5	12.0	11.75	1.75	1.25	0	
9	10.5	12.0	11.25	1.25	2.00	0	
10	13.0	9.0	11.00	1.00	2.50	0	
11	12.0	11.0	11.50	1.50	3.50	0	
12	11.0	12.0	11.50	1.50	4.50	0	
13	12.0	11.0	11.50	1.50	5.50	0	*

Exemple (carte CUSUM)

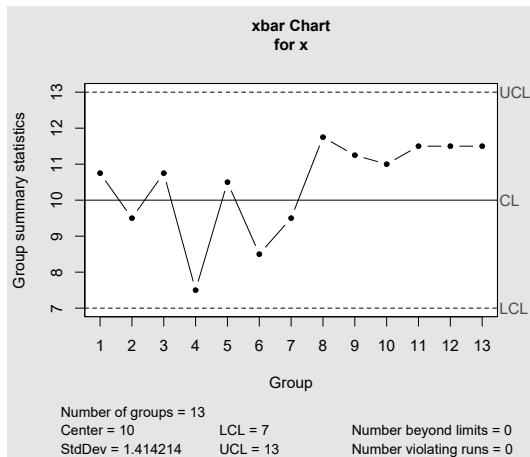


```
library(qcc)
x <- c(10.75,9.5,10.75,7.5,10.5,8.5,9.5,
      11.75,11.25,11,11.5,11.5,11.5)
CUSUM <- cusum(data=x,           # x = données
               sizes=2,          # size = taille échantillon
               center=10,        # center = mu_0
               std.dev=sqrt(2),  # std.dev = sigma
               decision.interval = 4.774, # decision.interval = h
               se.shift=1)       # se.shift = 2*k
```

$k = 0.5$ et $h = 4.774$

Processus sous-contrôle jusqu'à $t = 12$, alarme à $t = 13$

Exemple (carte Shewart)



```
library(qcc)
x <- c(10.75,9.5,10.75,7.5,10.5,8.5,9.5,11.75,
      11.25,11,11.5,11.5,11.5)
Shewart <- qcc(data=x, sizes=2, center=10,
               std.dev=sqrt(2), type="xbar", nsigmas=3)
```

Carte de Shewart avec les mêmes observations \Rightarrow Pas d'alarme

Principe de la carte

Décalage positif de la moyenne supérieur à k , écarts $(z_i - k)$ seront cumulés dans S_i^+ jusqu'à ce que S_i^+ atteigne h

Pour éviter d'avoir à remonter le handicap d'une valeur négative : $S_i^+ \geq 0$

Après un réglage, on réinitialise la carte CUSUM : $S_0^+ = S_0^- = 0$

Choix de la carte - comparaison avec la carte de Shewart

Comment comparer deux cartes de contrôle ?

- Probabilité de déceler un dérèglement
Carte de Shewart : proba connue
Carte CUSUM : proba dépend du numéro du contrôle
- Période Opérationnelle Moyenne, POM
 POM_{δ} : nb moyen de contrôle pour détecter un dérèglement δ
- Période Opérationnelle Maximum (POMAX)
nb max de contrôles pour déceler un dérèglement (seuil 95%)

Rq : détection d'un dérèglement peut être rapide mais nb de fausses alarmes augmente (POM_0 élevée et POM_{δ} faible)

Comparaison de la carte CUSUM et de la carte de Shewart

Déréglage δ	Shewart $L = 3.00$		CUSUM $k = 0.5, h = 4.774$		CUSUM $k = 1, h = 2.517$	
	POM	POMAX	POM	POMAX	POM	POMAX
0.00	370		370		370	
0.25	281	841	122	369	197	631
0.50	155	464	35	99	69	205
0.75	81	242	16	37	28	76
1.00	44	130	9.9	20	13.6	36
1.50	15.0	44	5.5	10	5.5	13
2.00	6.3	18	3.9	6	3.3	6
2.50	3.2	9	3.0	4	2.4	4
3.00	2	5	2.5	4	1.9	3
4.00	1.2	2	2.0	3	1.3	2
5.00	1.03	1	1.61	2	1.07	2

CUSUM > Shewart
si dérèglages faibles et
moyens

CUSUM < Shewart
si dérèglages élevés

Table – POM et POMAX pour cartes Shewart et CUSUM

```
library(spc)
> xcusum.arl(k=0.5, h=4.774, mu=1) ## calcul des POM
[1] 9.925031

> xcusum.crit.L0L1(L0=370,L1=9.9,sided="two") ## calcul des paramètres de la carte
      k      h
0.500785 4.767640
```

Choix des paramètres de la carte CUSUM

Trois paramètres à définir : h , k , n en fonction de :

- δ , dérèglement que l'on veut détecter rapidement
- POM_0

Proposition : $k = \delta/2$

Prendre ensuite h pour obtenir la POM_0 fixée

Dérèglement	nb contrôle			
petit ($\approx \sigma$)	10	$h = 4.77$	$k = 0.5$	n tq $\delta = 1$
moyen	3	$h = 2.52$	$k = 1$	n tq $\delta = 2$
important	au plus 2	$h = 1.6$	$k = 1.5$	n tq $\delta = 3$
très important	dès le premier	choisir carte de Shewart		

Améliorations possibles de la carte CUSUM

QUALITÉS DE LA CARTE CUSUM :

- Bonne détection des petits et moyens dérèglages
- Bonne détection des dérives lentes

DÉFAUTS DE LA CARTE CUSUM :

- Mauvaise réactivité si dérèglement dès le début
- Mauvaise détection des gros dérèglages

Carte à réponse rapide

DÉTECTION DES DÉRÉGLAGES DÈS LE DÉMARRAGE

\Rightarrow prendre $S_0^+ = h/2$ et $S_0^- = -h/2$

Déréglage δ	CUSUM $k = 0.5$ $h = 5, S_0^+ = S_0^- = 0$	CUSUM $k = 0.5$ $h = 5, S_0^+ = -S_0^- = 1$	CUSUM $k = 0.5$ $h = 5, S_0^+ = -S_0^- = 2.5$
0.00	465	461	430
0.50	38	36	29
1.00	10.4	9.0	6.4
2.00	4.0	3.4	2.4
3.00	2.6	2.2	1.54
5.00	1.7	1.3	1.02

Table – Périodes Opérationnelles Moyennes comparées de la carte CUSUM avec Initialisation à Réponse Rapide

Carte combinée CUSUM-Shewart

Meilleure détection des dérèglages importants

⇒ carte combinée CUSUM-Shewart

Pb : nb de fausses alarmes augmente ⇒ prendre $LCS = 3.5$ et $LCL = -3.5$ pour carte de Shewart

Dérèglage δ	Carte seule		Carte combinée CUSUM-Shewart		
	Shewart	CUSUM	$k = 0.5, h = 5$		
	$L = 3.00$	$k = 0.5, h = 5$	$L = 3.00$	$L = 3.50$	$L = 4.00$
0.00	370	465	223	391	459
0.50	155	38	34	37	38
1.00	43.9	10.4	9.8	10.2	10.4
2.00	6.3	4.0	3.5	3.8	4
3.00	2.0	2.6	1.8	2.1	2.4
5.00	1.02	1.7	1.02	1.07	1.16

Table – Comparaison des POM de la carte CUSUM et de cartes combinées CUSUM-Shewart

Carte allie qualités des cartes CUSUM et Shewart

Estimation de la date et de l'amplitude du dérèglement

Si alarme : $\left\{ \begin{array}{l} \text{réglage du processus} \\ \text{réinitialisation de la carte} \end{array} \right.$

Question : que faire des dernières productions ?

- Si dérèglement faible : vente
- Si dérèglement important : tri exhaustif de toute la production

⇒ Estimation de l'amplitude du dérèglement

Si tri : jusqu'à quand doit-on tout reconstruire ?

⇒ Estimation de la date du dérèglement

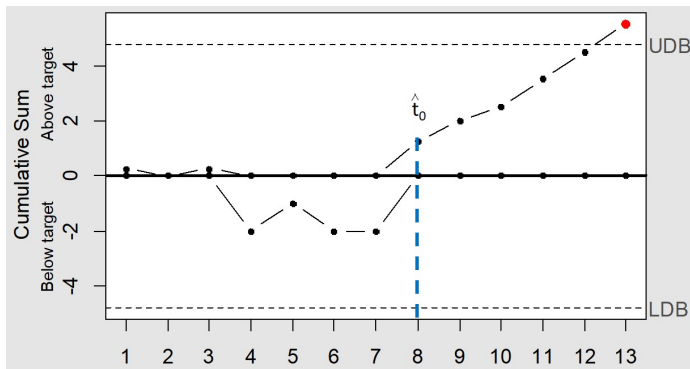
Estimation de la date et de l'amplitude du dérèglement

Hypothèse : alarme au contrôle t

\hat{t}_0 : estimateur de la date de dérèglement

$\hat{\delta}$: estimateur de l'amplitude du dérèglement

- \hat{t}_0 : dernier point de contrôle tel que $S_{\hat{t}_0-1} = 0$
- $\hat{\delta} = \frac{S_t^+}{t - \hat{t}_0 + 1} + k$ ou $\hat{\delta} = \frac{S_t^-}{t - \hat{t}_0 + 1} - k$



Carte EWMA (Exponential Weighted Moving Average)

- mêmes hypothèses que carte CUSUM
- plus simple d'utilisation, efficacité similaire

Principe de la carte :

$$\begin{cases} z_i = \lambda \bar{x}_i + (1 - \lambda)z_{i-1} \\ z_0 = \mu_0 \end{cases} \quad \text{avec } 0 < \lambda \leq 1$$

z_i = moyenne pondérée du passé z_{i-1} , et du présent \bar{x}_i

- λ petit : résultats du passé importants, faibles dérives bien détectées
- λ grand : bonne réactivité aux dérèglages brusques et élevés

Remarque : si $\lambda = 1$: carte de Shewart

Détermination des limites de la carte

$$z_i = \lambda \sum_{j=0}^{i-1} (1 - \lambda)^j \bar{x}_{i-j} + (1 - \lambda)^i z_0$$

z_i = moyenne pondérée des \bar{x}_k

\bar{x}_k a un poids d'autant plus faible qu'il est loin dans le passé

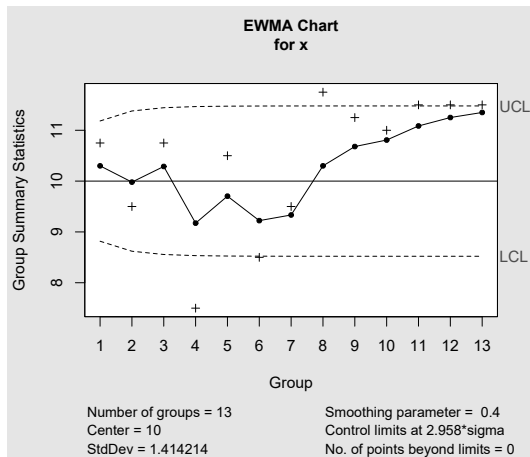
$$Var(z_i) = \frac{\sigma^2}{n} \frac{\lambda (1 - (1 - \lambda)^{2i})}{2 - \lambda} \quad (\text{si indépendance des } \bar{x}_k)$$

$$\lim_{i \rightarrow \infty} Var(z_i) = \sigma_z^2 = \frac{\sigma^2}{n} \frac{\lambda}{2 - \lambda}$$

Limite de contrôle supérieure $LCS = \mu_0 + L\sigma_z$

Limite de contrôle inférieure $LCI = \mu_0 - L\sigma_z$ avec $L \approx 3$

Définition de la carte EWMA



```
library(qcc)
x <- c(10.75,9.5,10.75,7.5,10.5,8.5,9.5,
      11.75,11.25,11,11.5,11.5,11.5)
EWMA <- ewma(data=x,
              sizes=2, # size = nb échantillon
              center=10, # center = mu_0
              std.dev=sqrt(2), # std.dev = sigma
              lambda= 0.4, # lambda = h
              nsigmas=2.958) # nsigmas=L
```

Figure – Carte EWMA avec $\lambda = 0.4$ et $L = 2.958$

Processus sous contrôle

Définition de la carte EWMA

TROIS PARAMÈTRES À DÉFINIR : λ , L et n

Déréglage	Nb de contrôle		
petit	10	$L = 2.8$ $\lambda = 0.15$	$n \text{ tq } \delta = 1$
moyen	3	$L = 2.96$ $\lambda = 0.4$	$n \text{ tq } \delta = 2$
important	au plus 2	$L = 3$ $\lambda = 0.7$	$n \text{ tq } \delta = 3$
très important	dès le premier	choisir une carte de Shewart	

Périodes opérationnelles moyennes de la carte EWMA

δ	Shewart $L = 3.00$		EWMA $\lambda = 0.5 \ L = 2.978$		EWMA $\lambda = 0.4 \ L = 2.958$		EWMA $\lambda = 0.25 \ L = 2.898$	
	POM	pomax	POM	pomax	POM	pomax	POM	pomax
0.00	370		370		370		370	
0.25	281	841	196	584	174	515	135	397
0.50	155	464	72	210	58	169	41	114
0.75	81	242	30	86	24	67	18	46
1.00	44	130	15.2	41	12.7	33	10.3	24
1.50	15.0	44	6.0	14	5.5	12	5.2	10
2.00	6.3	18	3.4	7	3.3	6	3.5	6
2.50	3.2	9	2.4	4	2.4	4	2.6	4
3.00	2	5	1.9	3	1.9	3	2.2	3
4.00	1.2	2	1.3	2	1.39	2	1.7	2
5.00	1.03	1	1.07	1	1.10	1	1.27	2

Table – Périodes Opérationnelles Moyennes et POMAX pour cartes Shewart et EWMA

Pour calculer les valeurs dans la table :

```
library(spc)
xewma.arl(1 = 0.4, cE = 2.958, mu=1, sided="two")
```

Rq : Existence de cartes EWMA à réponses rapides et cartes combinées EWMA-Shewart