

Régression non-paramétrique

Philippe Real

16/09/2019

1. Etude de la densité g des X

On utilise les données Data1. Jeux de données (X_i, Y_i) $i=1, \dots, 2000$

Avec la représentation suivante $Y_i = r(X_i) + \sigma \xi_i(X_i)$ où (X_i, Y_i) sont i.i.d. et σ ne dépend pas de X (homoscédastique).

- La loi de X_i admet une densité $g(x)$

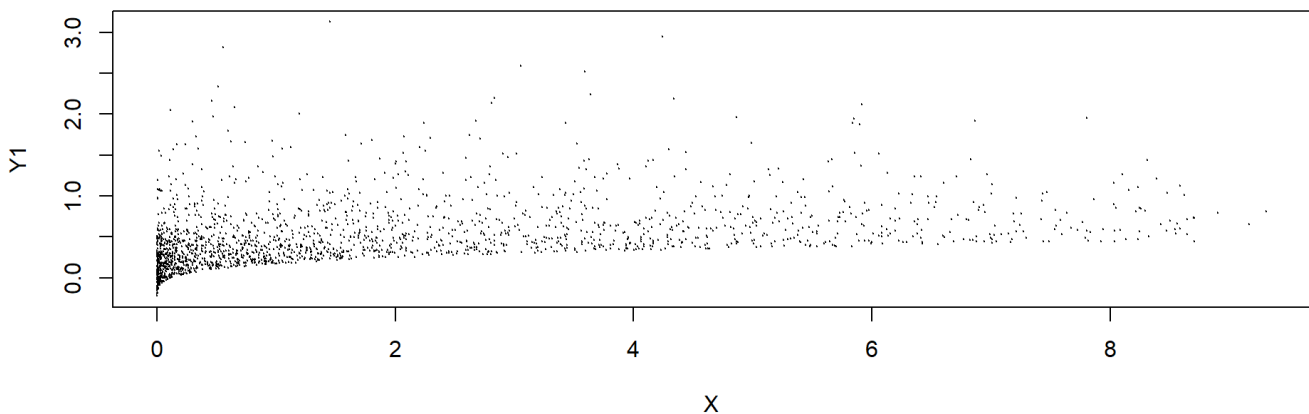
- Les ξ_i sont i.i.d avec $\mathbb{E}(\xi_i) = 0$ et $\mathbb{E}(\xi_i^2) = 1$ et ont une densité μ .

- X_i et ξ_i sont indépendants.

1.0 Lecture des données et premières analyses

```
##      X.1      X      Y1
## Min.   : 1.0   Min.   :0.000005 Min.   : -0.2244
## 1st Qu.: 500.8 1st Qu.:0.258074 1st Qu.: 0.2619
## Median :1000.5 Median :1.192414 Median : 0.4303
## Mean   :1000.5 Mean   :2.029447 Mean   : 0.5112
## 3rd Qu.:1500.2 3rd Qu.:3.318174 3rd Qu.: 0.6735
## Max.   :2000.0 Max.   :9.308684 Max.   : 3.1263
```

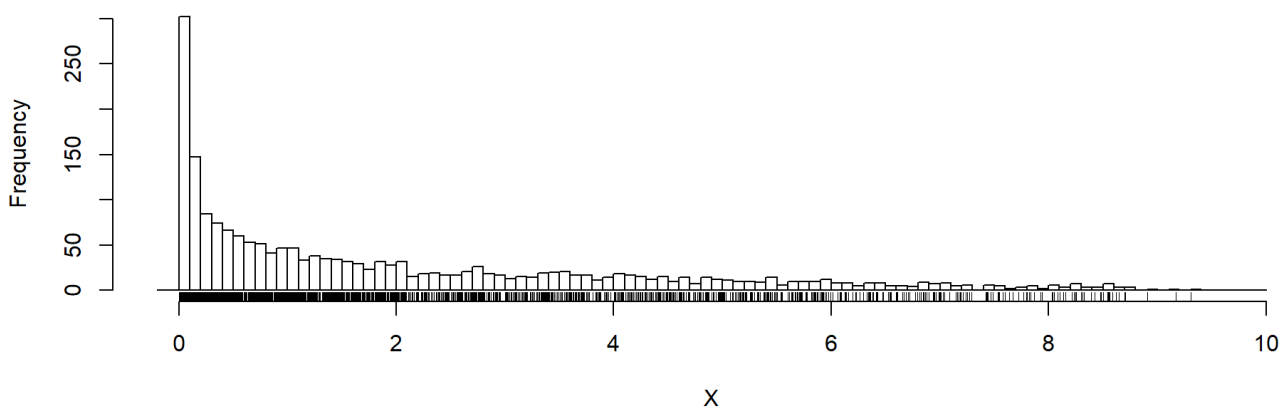
Jeux de données Data1.



Pour avoir une idée de la densité g de X on peut tracer son histogramme qui est un estimateur de la densité. Obtenu par la série d'approximation suivante:

$$g(x_0) \approx_{h \rightarrow 0} \frac{\mathbb{P}(X \in [x_0 - h, x_0 + h])}{2h} \approx_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2nh} \sum_{i=1}^n 1_{X_i \in [x_0 - h, x_0 + h]} := \hat{g}_{n,h}(x_0)$$

Histogram of X



Cet estimateur a de bonnes propriétés statistiques mais a l'inconvénient de n'être jamais régulier.

1.1 Estimateur par noyau de la densité $g(x)$ de X

La méthode par noyau est une généralisation de la méthode d'estimation par histogramme. Elle permet de construire un estimateur avec de meilleures propriétés de régularité notamment de continuité.

On a un échantillon (X_1, X_2, \dots, X_n) i.i.d, réalisation d'une variable aléatoire X dont on cherche à estimer la densité g .

Un estimateur par noyaux est donné par $\hat{g}(x_0) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x_0 - X_i}{h}\right)$

K est le noyau régularisant que l'on prend gaussien $K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2}$

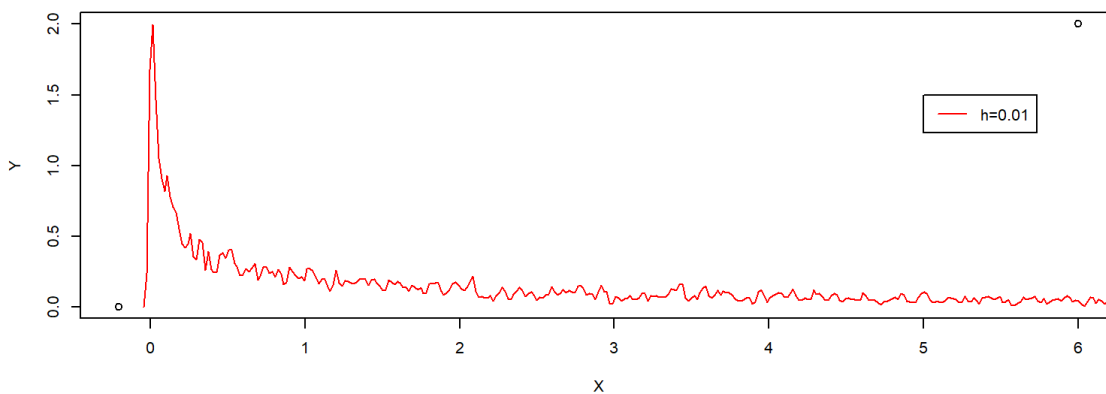
L'estimateur est basé sur la série d'approximation suivante :

$$g(x_0) \approx_{h \rightarrow 0} E\left(\frac{1}{h} K\left(\frac{x_0 - X}{h}\right)\right) \approx_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x_0 - X_i}{h}\right) := \hat{g}_{n,h}(x_0)$$

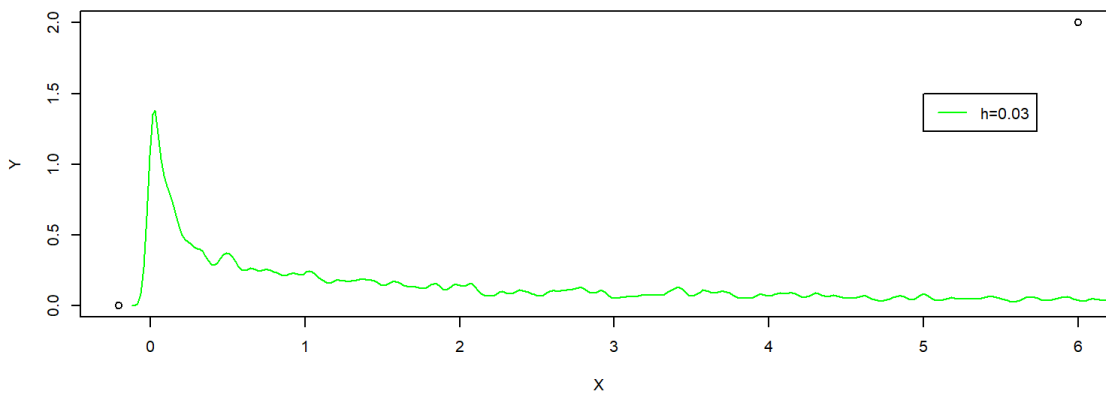
Pour implémenter ces méthodes, dans le cas de l'estimation de la densité on va utiliser la fonction `bkde` du package `KernSmooth`. On prendra pour noyau le noyau normal. Ce choix peut sembler arbitraire, mais on a vu que ce n'est pas le choix du noyau qui est le plus important dans l'estimation de la densité. On calcule cet estimateur de la densité pour différentes largeurs de fenêtre: h (bandwidth) Et on va déterminer de manière empirique une valeur de h qui semble adaptée.

Graphique pour de petites valeurs de la fenêtre h : 0.01 / 0.03 / 0.05

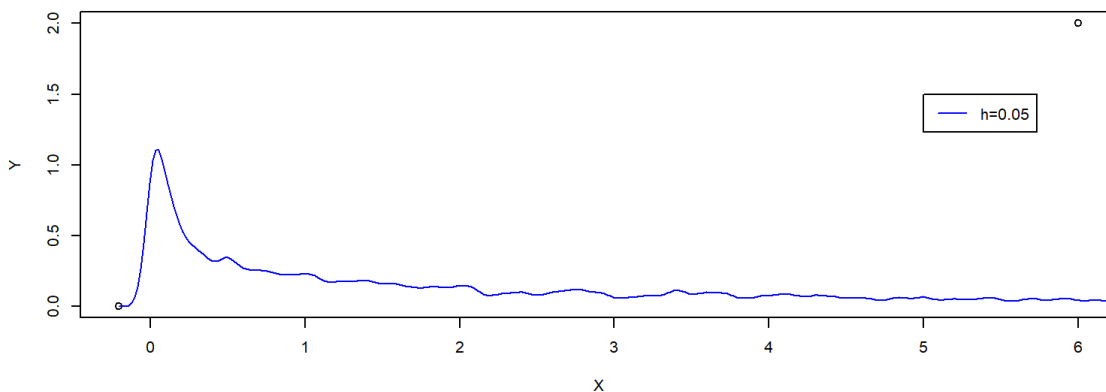
Estimation de la densité par noyaux pour $h=0.01$



Estimation de la densité par noyaux pour $h=0.03$

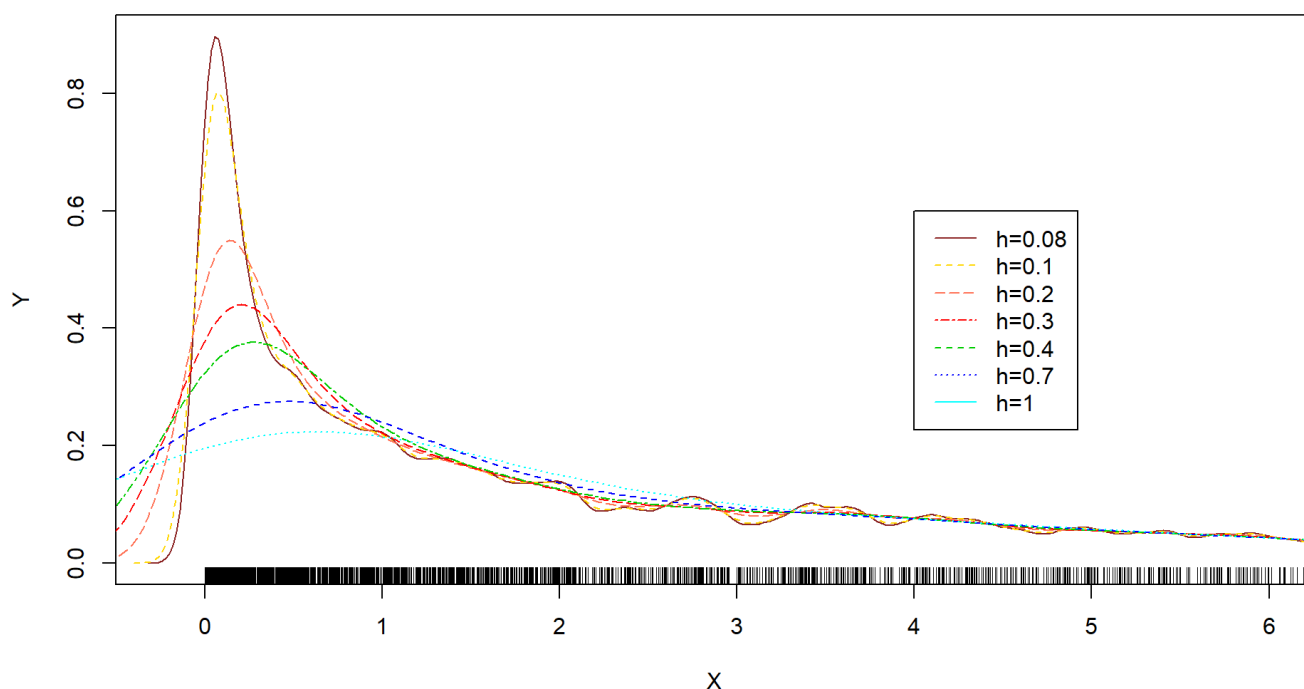


Estimation de la densité par noyaux pour $h=0.05$



On remarque de fortes oscillations pour des h entre 0.01 et 0.05.

Estimation de la densité par noyaux pour différents h



A partir de $h = 0.2$ l'approximation est plus régulière.

Raison pour laquelle ce choix est important et ce qui se produit si h est mal choisi

- Si h est trop grand (courbes bleues) noyau trop régularisant, estimateur régulier mais biaisé.
- Si h est trop petit (courbes marron du graphique ci-dessus) l'estimateur est très oscillant, la variance est importante mais le biais est faible. Il faut donc trouver un h intermédiaire, un compromis qui minimise la variance sans entraîner trop de biais. Un h compris entre 0.8 et 3 semble correct.

1.2 Estimation par noyau gaussien de la densité $g(x)$ de X avec un h optimal

On commence par déterminer un paramètre de lissage ou fenêtre h optimale. Dans le sens qu'elle minimise une fonction de coût, ou critère d'erreur. Du type MSE (Erreur quadratique moyenne), MISE (Erreur Quadratique Intégrée Moyenne) ou AMISE (Erreur Quadratique Intégrée Moyenne Asymptotique).

Plus précisément on introduit l'estimateur du risque par validation croisée

$$\hat{J}(h) = \int_{\mathbf{R}} \hat{f}_{n,h}(x)^2 dx - \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \hat{f}_{(-i),n,h}(X_i)$$

Avec $\hat{f}_{(-i),n,h}$ obtenu en calculant l'estimateur sur l'échantillon privé de la donnée X_i .

On choisit \hat{h} qui minimise ce risque. $\hat{J}(\hat{h}) = \min_h \hat{J}(h)$

On obtient cette fenêtre optimale par la fonction `bw.ucv` de la librairie `stats` qui implémente la validation croisée, mais aussi en utilisant d'autres méthodes.

1.2.1 Fenêtre h optimale par validation croisée

Utilisation de la fonction `bw.ucv` library `stats`

```
## [1] 0.05675136
```

1.2.2 Fenêtre h optimale par la règle de Silverman

En appliquant la règle de Silverman, on obtient le h suivant:

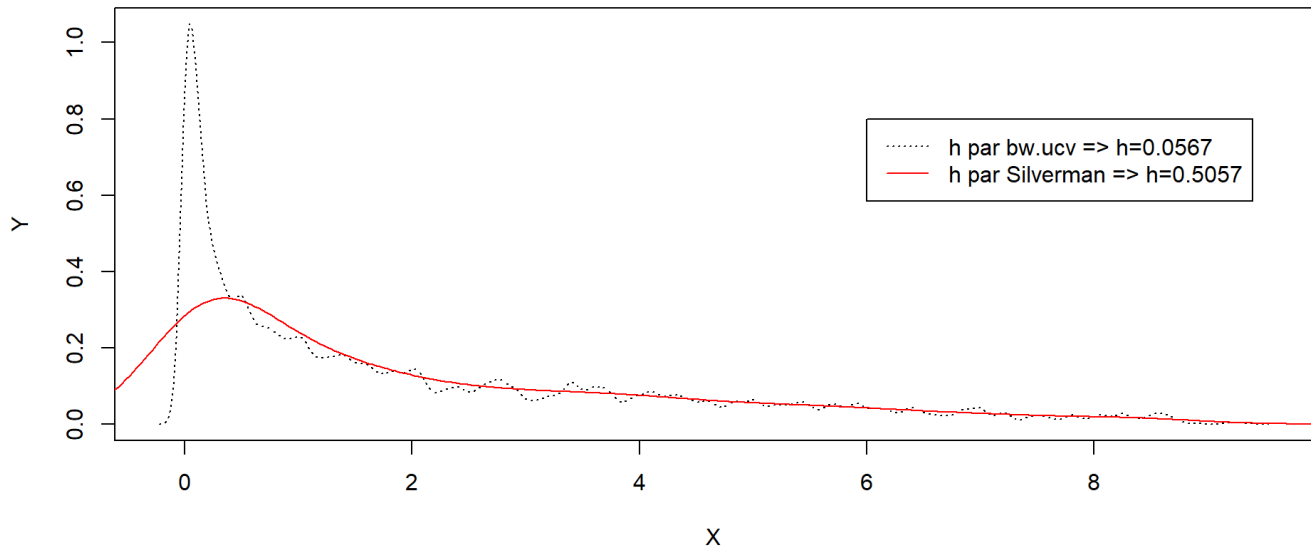
```
## [1] 0.505695
```

On obtient le même résultat avec la fonction: `bw.nrd`

Fenêtre h optimale par avec la fonction `bw.nrd`

```
## [1] 0.505695
```

Estimateurs par noyaux gaussien de la densité g des X et différents h.



1.2.3 Fenêtre h optimale - Méthodes alternatives

Fonction density

On peut regarder le résultat de la fonction density du package RSmooth qui teste différents noyaux et renvoie un h optimal

```
## [1] 0.4293637
```

Fonction dpik

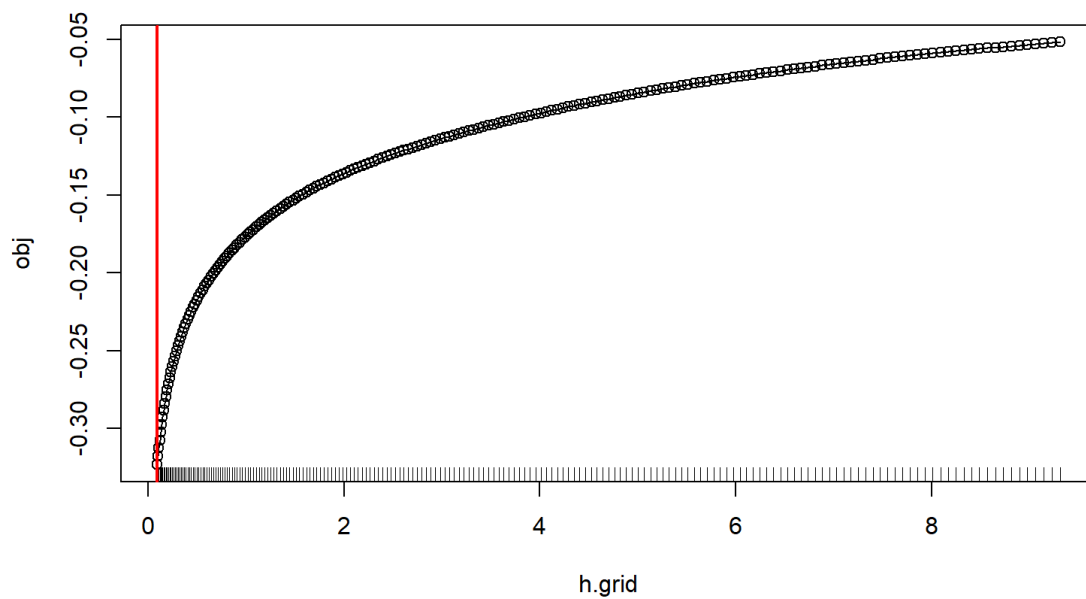
Méthode du package Kersmooth: pour la selection d'une fenêtre optimale.

```
## [1] 0.1439489
```

Fonction ucv recodée

La fenêtre h est obtenu par (UCV) de Least Squares Cross-Validation curve (LSCV) et h obtenu (UCV)

Least Squares Cross-Validation curve (LSCV) et h obtenu (UCV)



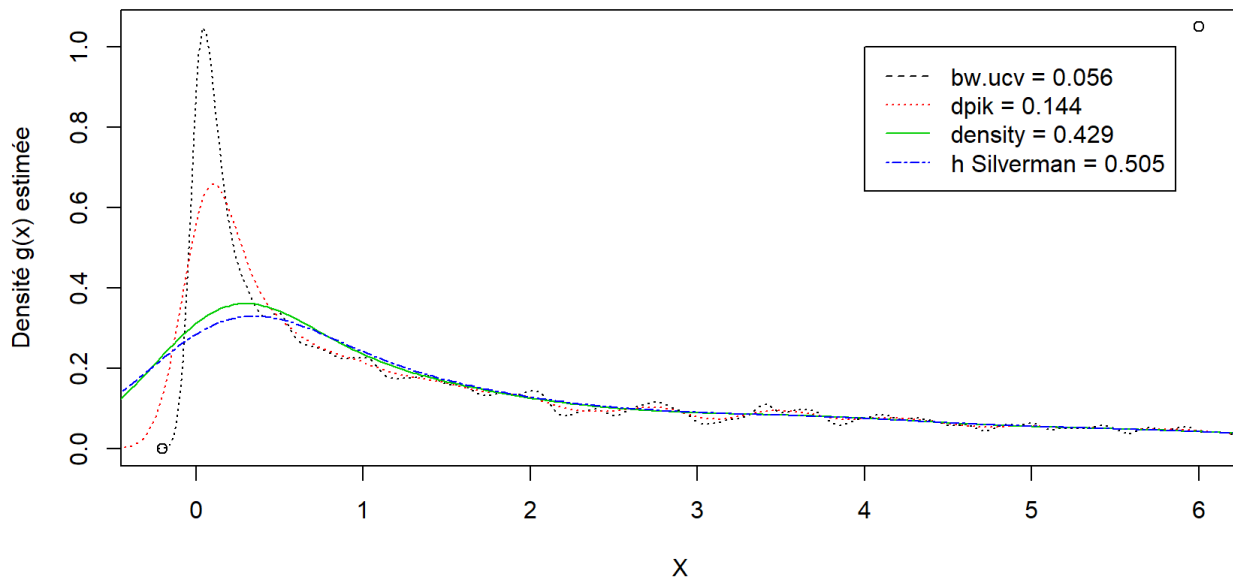
```
## [1] 0.09308678
```

Résumé des résultats

Méthode	valeur de h
bw.ucv	0.0567514
ucv recodée	0.0930868
dpik	0.1439489
density	0.4293637
Regle Silverman	0.505695

A partir de ces paramètres h on va implémenter les estimateurs à noyau de la densité à partir de la fonction bkde de R.

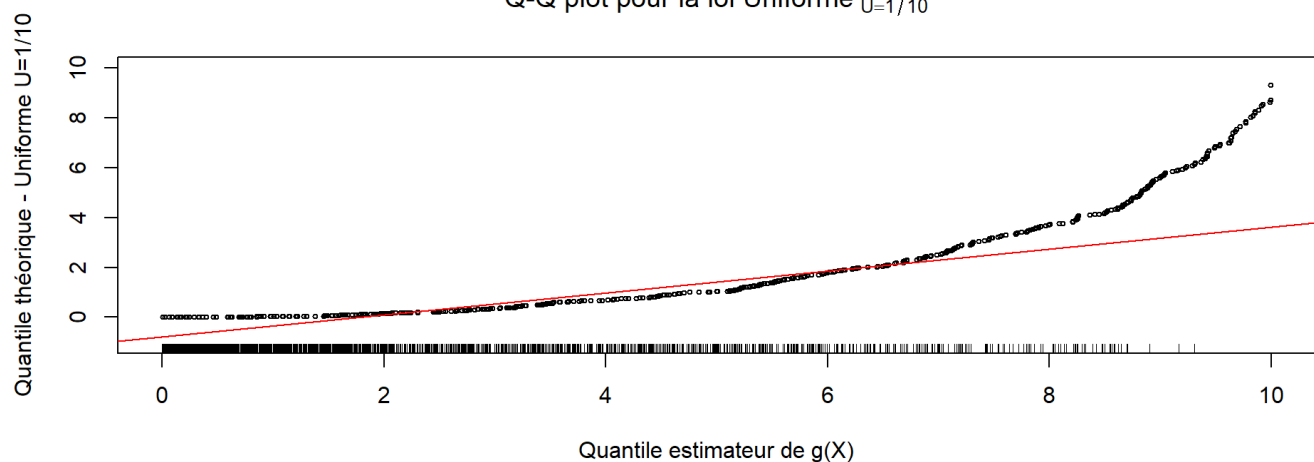
Estimateurs par noyaux gaussien de la densité g des X pour différents h



1.3 QQPlot - g(x) densité Uniforme

Implementation d'un QQ-plot pour vérifier empiriquement l'hypothèse g(x) suit (ou pas) une densité Uniforme $U=1/10$ sur $[0,10]$

Q-Q plot pour la loi Uniforme $U=1/10$



A la vue du graphique QQPlot par rapport à la loi uniforme ($U=1/10$) l'hypothèse selon laquelle g est uniforme n'est pas valide. En particulier dans la zone où X est entre 0 et 2 et où X est au delà de 6. La densité des individus est faible sur la dernière zone ($X>6$) mais à contrario très importante pour ($X<2$). On ne peut donc accepter l'hypothèse.

1.4 Zone de l'espace où l'estimation de r sera plus précise

On aura plus de précision où la densité des données est importante. Le quantile à 90% se situe au point $x=5.461349$. On a une répartition de 90% des données sur la 1ère moitié de l'intervalle: $[0+\text{dela}, 5.46]$. La variance ne dépend pas de X et semble assez constante. Donc plus de précision dans l'intervalle $[0+\text{dela}, 5.46]$. La précision diminue ensuite (sur l'axe des abscisses à droite).

2. Reconstruction de $r(x)$

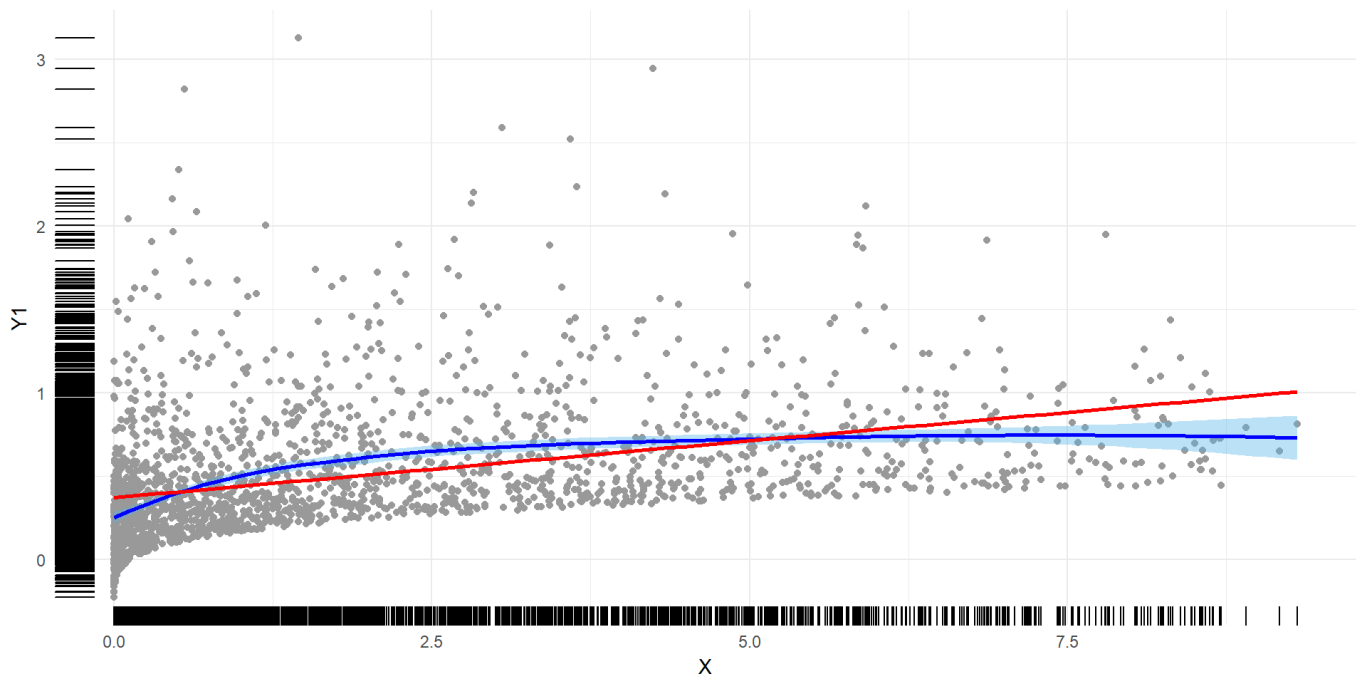
On est dans le cadre de l'estimation non paramétrique, on reprend les hypothèses classiques. On utilise les données de Data1, (X, Y)

2.1 Linéarité de la fonction r

Pour vérifier la linéarité on va tracer sur un même graphique, le nuage de points ainsi que la droite de régression linéaire $Y \sim X$. On va y ajouter la courbe de regression locale de type loess. Avec cette méthode l'ajustement se fait localement, par ajustement d'un polynôme de degès 1 ou 2. Cette dernière courbe indique la tendance globale entre nos 2 variables, que l'on va comparer à la droite de régression linéaire.

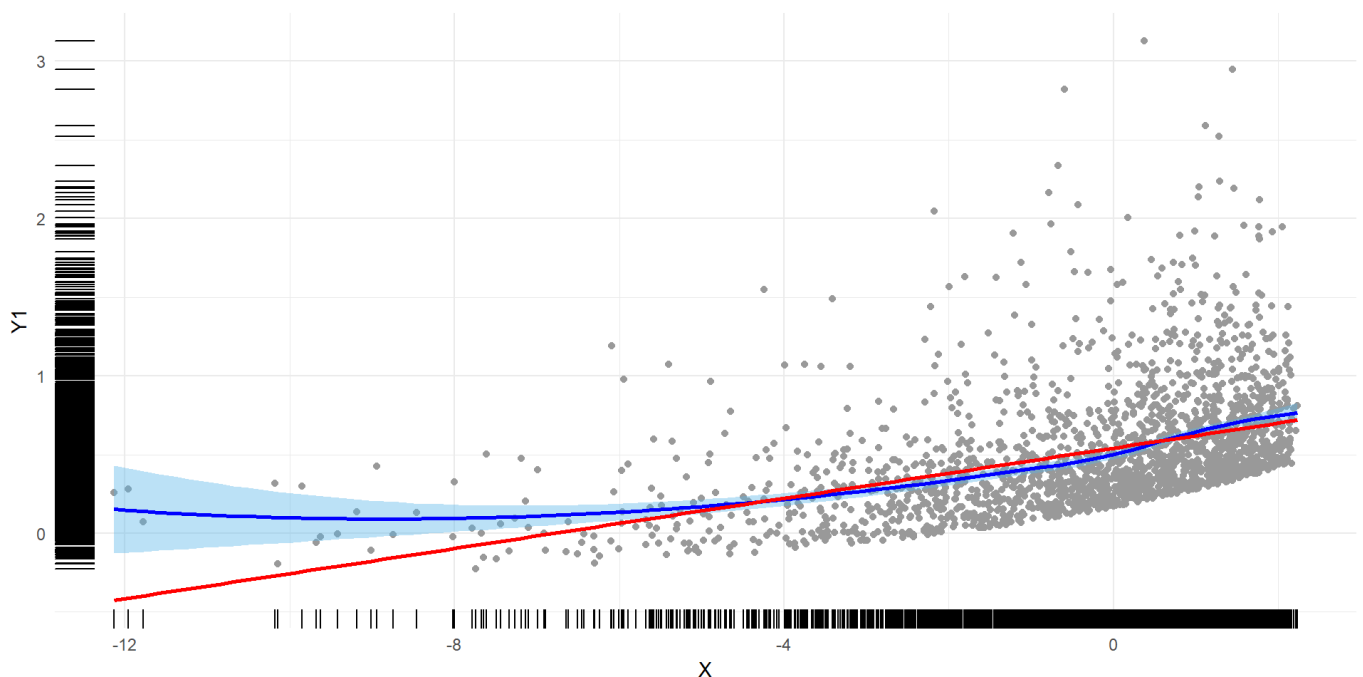
On utilise la fonction de R `stat_smooth` de la librairie `ggplot2` avec l'option `method=lm` pour construire la régression linéaire simple (en rouge). et l'option `method=loess` pour construire la régression de type loess (en bleue).

- Tout d'abord on trace Y_1 en fonction de X .



Sans transformation, à la vue du graphique, r ne peut être linéaire. La forme de la courbe loess suggère d'utiliser la transformation $\log(X)$ pour linéariser.

- Maintenant On trace Y_1 en fonction de $\log(X)$



Dans la région $X_i \in [-5, 1]$ où l'on retrouve la quasi totalité de l'échantillon, on a une bonne adéquation des courbes loess et lm , la transformation ($\log(x)$) a permis de bien linéariser.

2.2. Construction d'un estimateur non-paramétrique de $r(x)$ par noyaux régularisants

Ces méthodes de lissage par noyau consistent à effectuer au voisinage de chaque point une régression locale. Qui dans le cas Nadaraya-Watson est linéaire et est polynomiale dans le cas des méthodes par polynômes locaux. La localisation est assurée par la fonction de poids le noyau K . On le prend gaussien $K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2}$

Plus précisément en posant $K_h(x_0 - x) = \frac{1}{h} K\left(\frac{x_0 - x}{h}\right)$ on a en utilisant la représentation $Y_i = r(X_i) + \sigma\xi_i$ que

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_h(x_0 - X_i) Y_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_h(x_0 - X_i) r(X_i) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_h(x_0 - X_i) \sigma \xi_i$$

$$\approx_{n \rightarrow \infty} \mathbb{E}[K_h(x_0 - X_i) r(X_i)] = \int_{\mathbf{R}} K_h(x_0 - x) r(x) g(x) dx \approx_{h \rightarrow 0} r(x_0) g(x_0)$$

On a vu au §1 que l'on peut estimer le terme $g(x_0)$ par un estimateur à noyau. Il nous reste donc à estimer $r(x_0)$.

L'estimateur de Nadaraya-Watson est l'estimateur défini par la formule suivante

$$\hat{r}_{n,h}(x_0) = \frac{n^{-1} \sum_{i=1}^n K_h(x_0 - X_i) Y_i}{n^{-1} \sum_{i=1}^n K_h(x_0 - X_i)} = \sum_{i=1}^n w_{i,n}(x_0) Y_i$$

$$\text{avec } w_{i,n}(x_0) = \frac{K_h(x_0 - X_i)}{\sum_{i=1}^n K_h(x_0 - X_i)}$$

Pour l'estimateur par polynômes locaux, l'approximation localement constante est remplacée par un polynôme.

Pour implémenter ces estimateurs, on commence par déterminer le paramètre de lissage h . Puis à partir des paramètres h obtenus on implémente les méthodes de lissage de Nadaraya-Watson et les méthodes par polynômes locaux.

Détermination de la fenêtre h

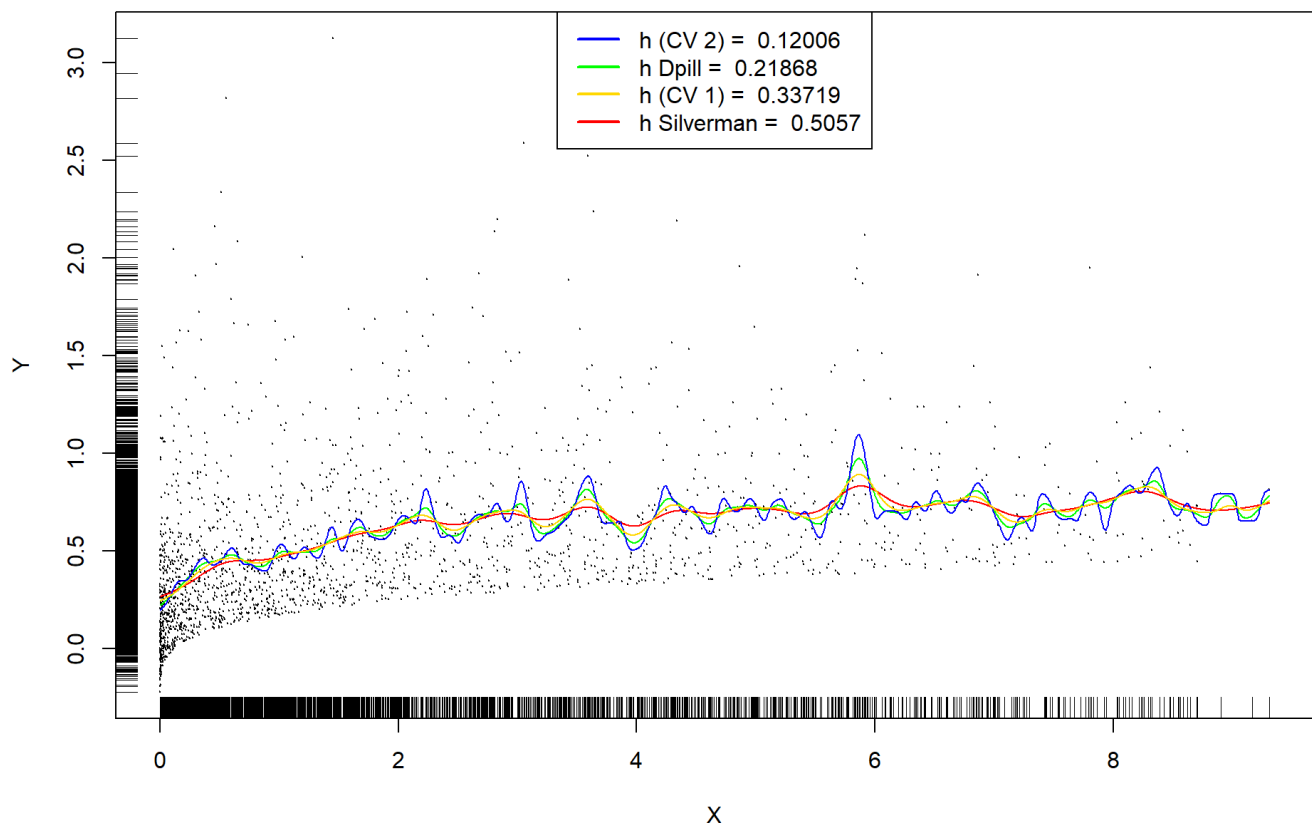
On obtient différentes fenêtres h obtenues à partir des méthodes: fonction `dpill` de R, h de Silverman, validation croisée.

```
## [1] "h_dpill : 0.218684860290525 h_silver : 0.505695020156574 h_CV1 ; 0.337185929648241 h_CV2 ; 0.120060113212087"
```

Estimateurs \hat{r} de r par Nadaraya-Watson avec la librairie `stat` - fonction : `ksmooth`

Utilisation de la fonction `ksmooth` et différentes fenêtre $h_{dpill}=0.2186849$, $h_{silver}=0.505695$, $h_{CV1}=0.3371859$, $h_{CV2}=0.1200601$

Nadaraya-Watson avec `ksmooth` et différents h

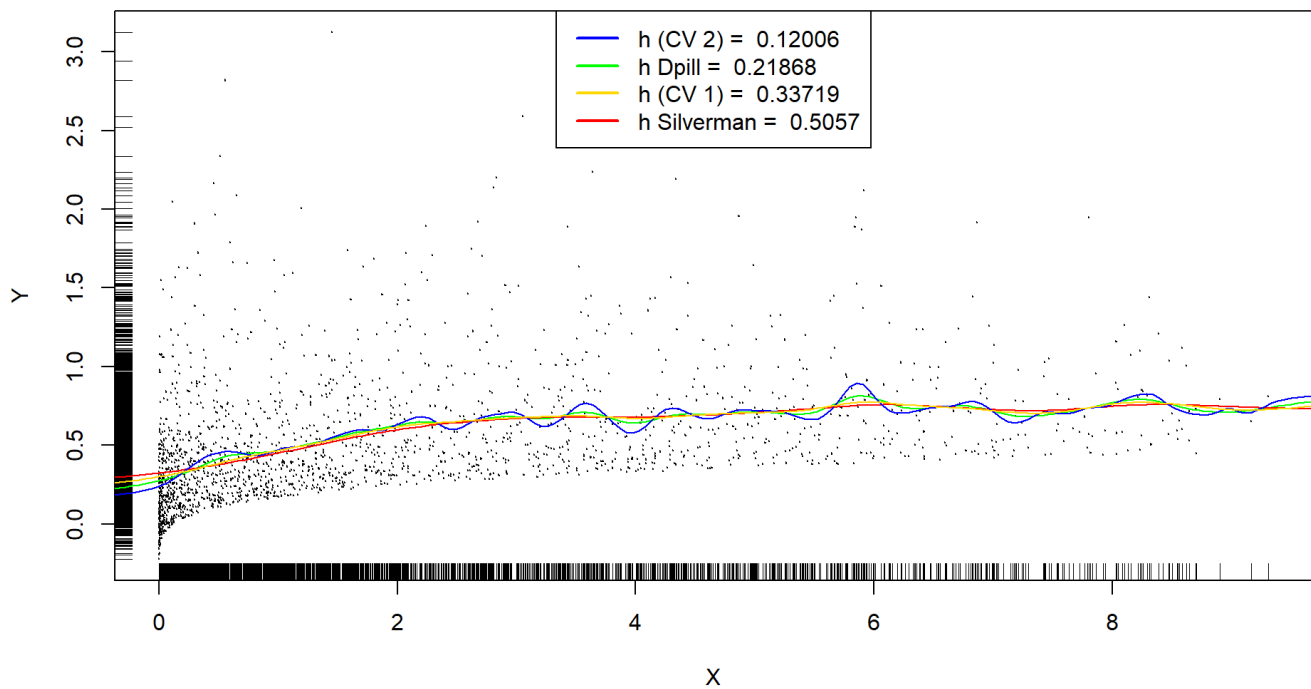


L'estimateur est sensible au choix de h . L'estimateur de Nadaraya-Watson est très oscillant par construction.

Estimateurs \hat{r} de r par Nadaraya-Watson à partir de la fonction recodée NW

Utilisation de la fonction NW et différentes fenêtre $h_{dpill}=0.2186849$, $h_{silver}=0.505695$, $h_{CV1}=0.3371859$, $h_{CV2}=0.1200601$

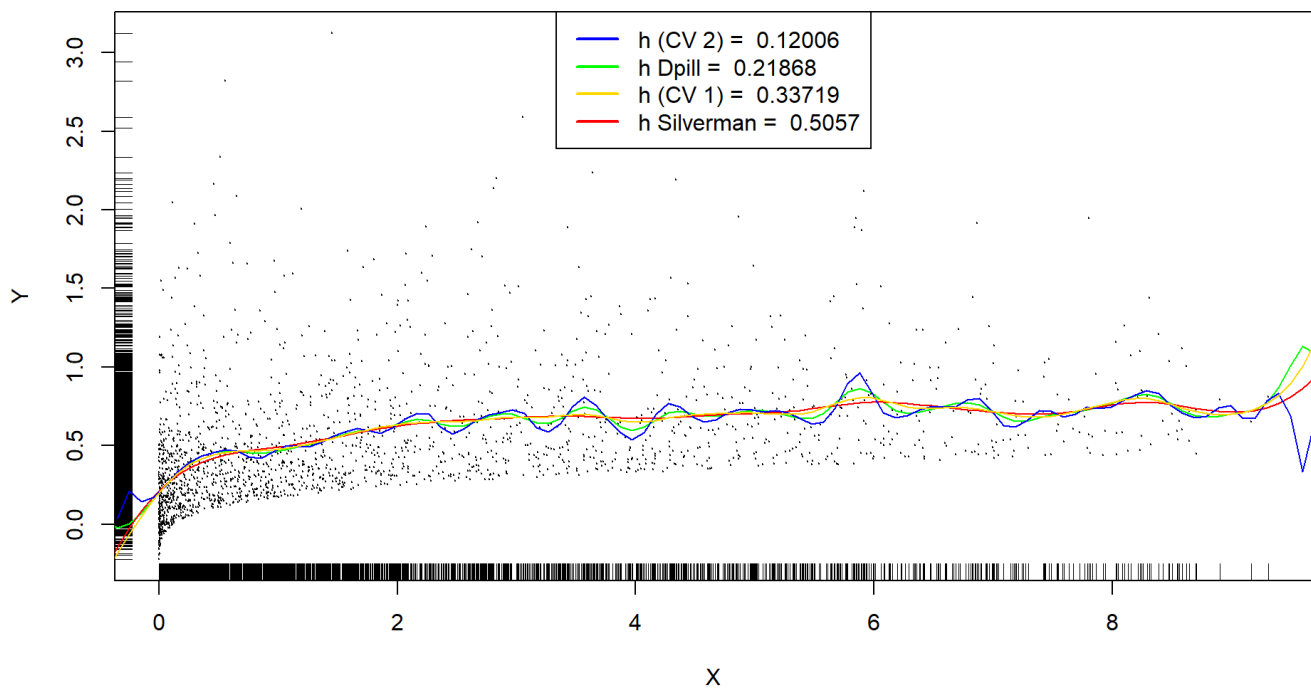
Nadaraya-Watson avec la fonction mNW et différents h



Estimateurs \hat{r} de r par polynômes locaux

Utilisation de la fonction locpoly du package Kersmooth avec différentes fenêtre $h_{dpill}=0.2186849$, $h_{silver}=0.505695$, $h_{CV1}=0.3371859$, $h_{CV2}=0.1200601$ On choisi le degrés 2.

Polynômes locaux de degrés 2 avec locpoly et différents h



2.3. Estimation de r en regressant Y_1 sur $\log(X)$

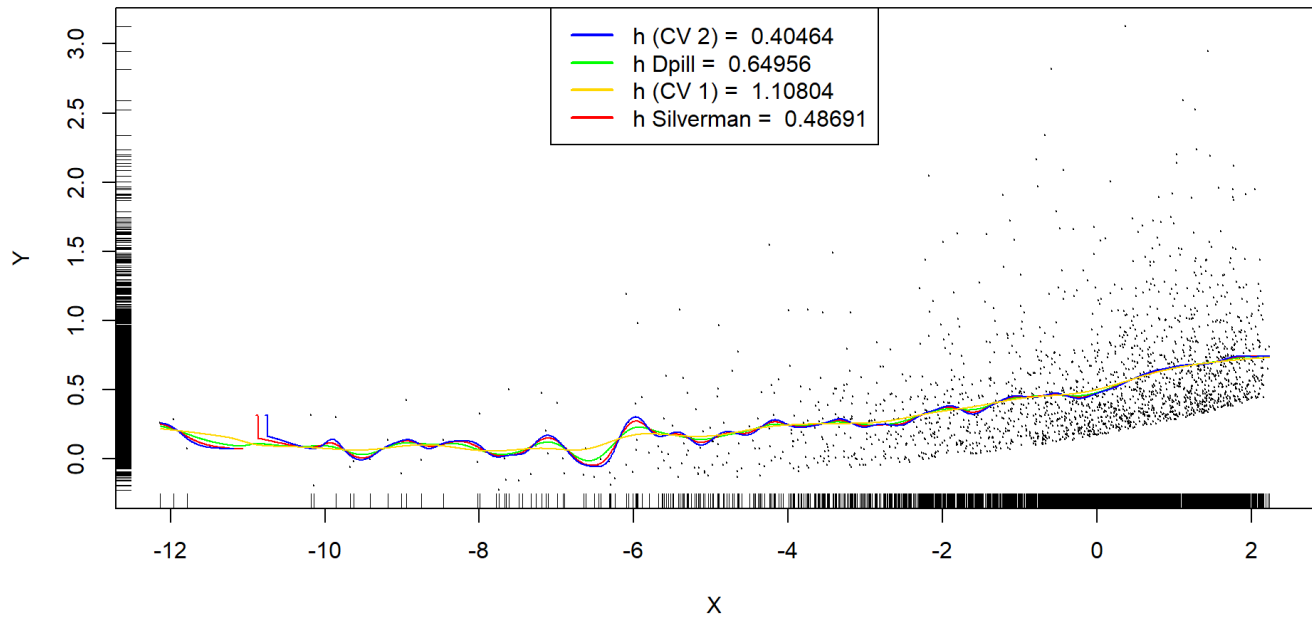
On suit la même démarche qu'au §2.2. On commence par déterminer un h optimal à partir de la fonction $dpill$, de la règle de Silverman et par validation croisée.

```
## [1] "h_dpill : 0.649558017143598 h_silver : 0.48691251968111 h_CV1 ; 1.10804020100503 h_CV2 ; 0.404638091616267"
```

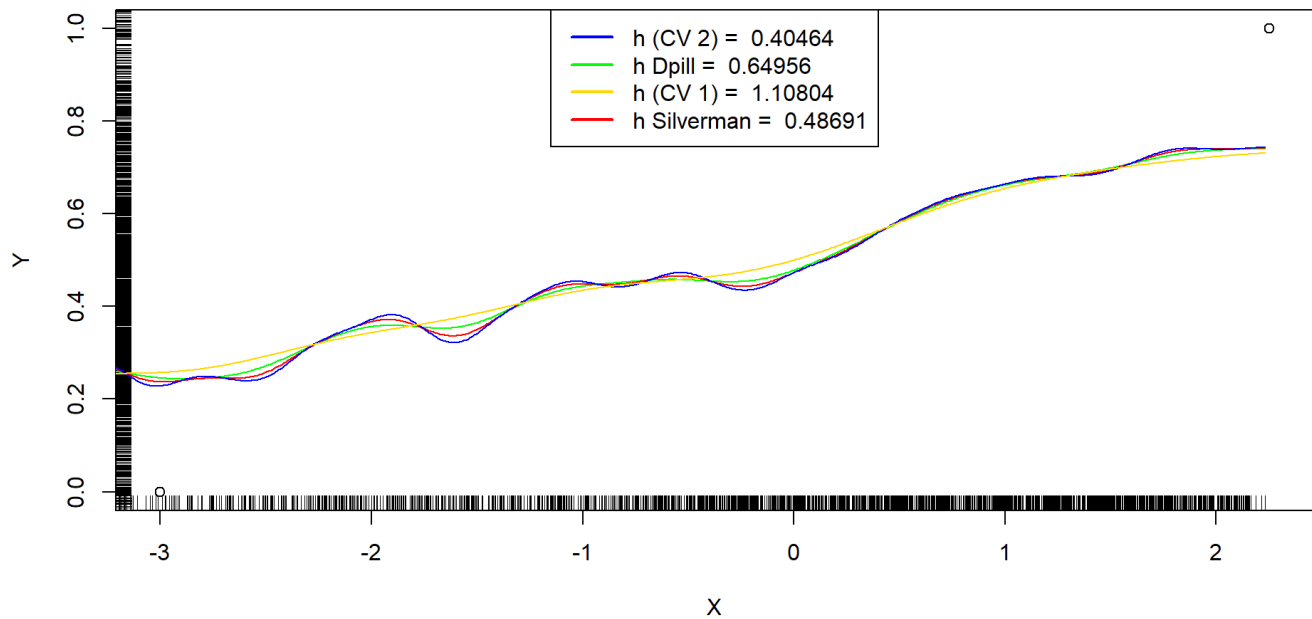
Estimateurs \tilde{r} de r par Nadaraya-Watson avec la librairie stat - fonction : `ksmooth`

Utilisation de la fonction `ksmooth` avec différentes fenêtres $h_{dpill}=0.649558$, $h_{silverman}=0.4869125$, $h_{CV1}=1.1080402$, $h_{CV2}=0.4046381$

Estimateurs construit avec Nadaraya-Watson: `ksmooth` et différents h



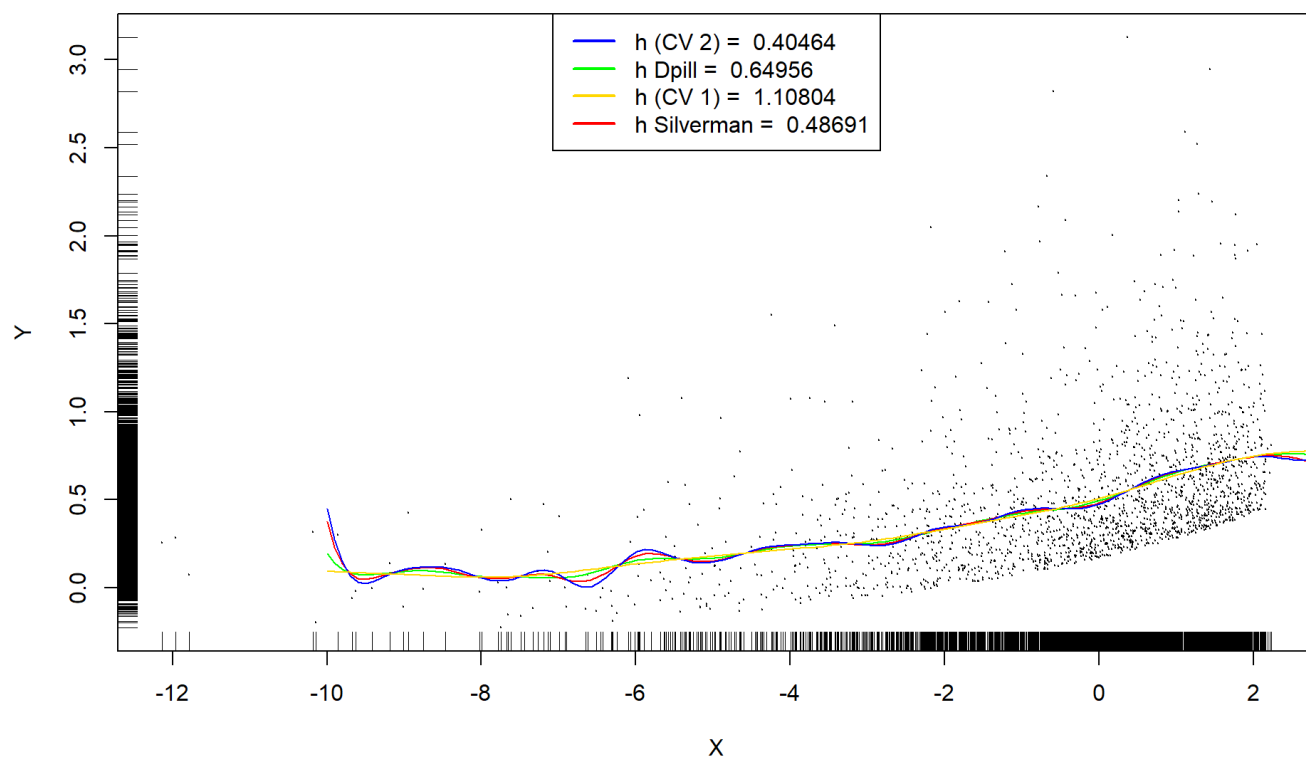
Zoom sur l'intervalle $[-3, 2]$



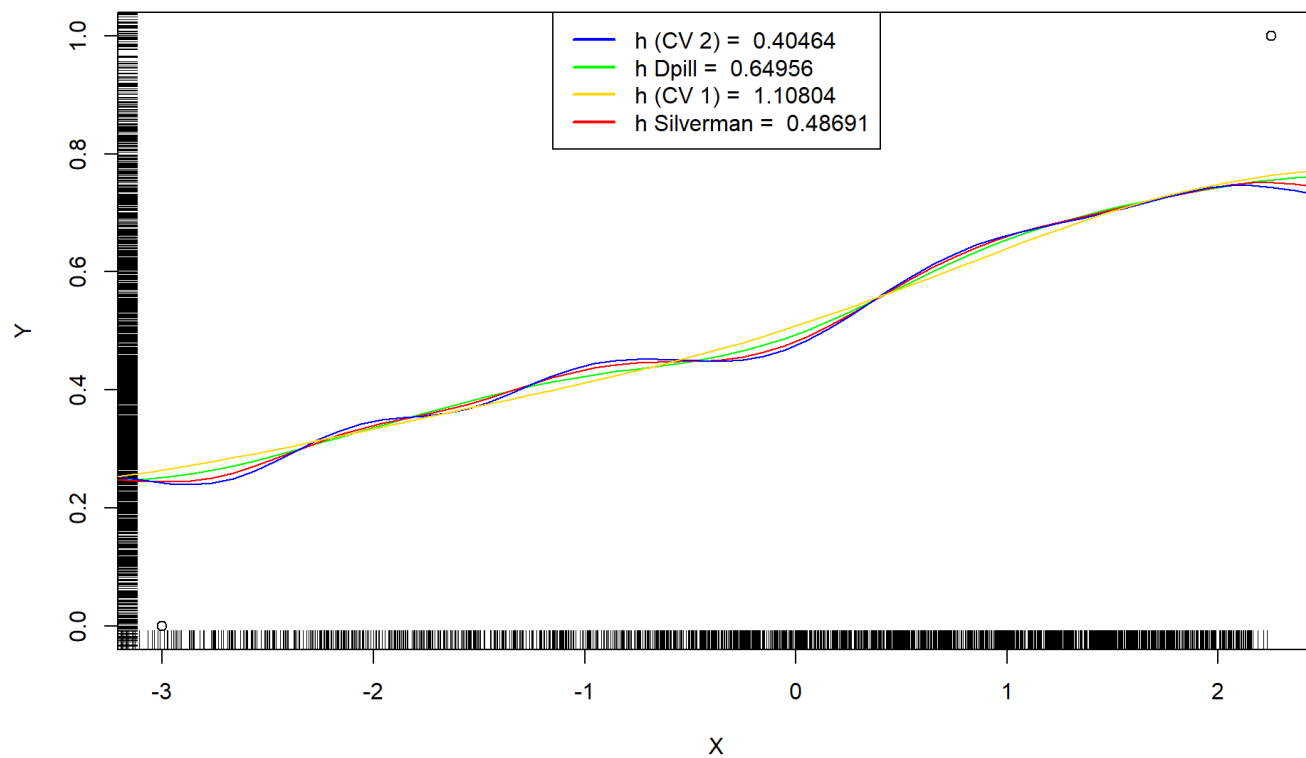
Estimateurs \tilde{r} de r par polynômes locaux de degrés 2

Utilisation de la fonction `locpoly` avec différentes fenêtres $h_{\text{dpill}}=0.649558$, $h_{\text{silverman}}=0.4869125$, $h_{\text{CV1}}=1.1080402$, $h_{\text{CV2}}=0.4046381$

Estimateurs construit par polynômes locaux de degrés 2: `locpoly` et différents h



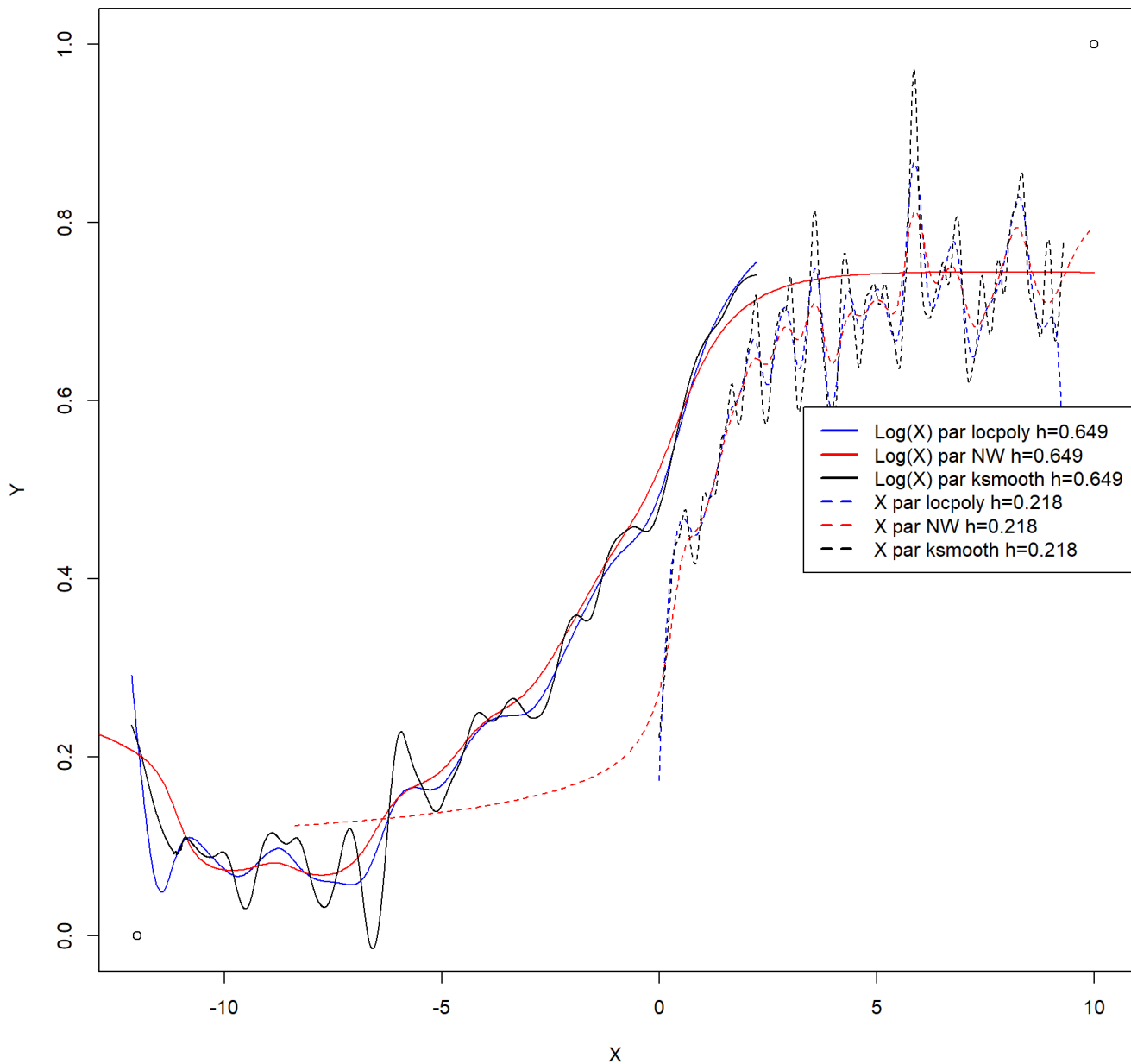
Zoom sur l'intervalle $[-3, 2]$



Ces estimateurs sont plus régularisants par construction que l'estimateur de Nadaraya-Watson construits avec `ksmooth`.

Représentation sur un même graphe de \hat{r} et \tilde{r}

Estimateurs par Nadaraya–Watson et locPoly de degrés 2



2.4. Remarques - Explications

Dans les zones où la densité est élevée ($\log(X_i) \in [-4, 2]$ pour $\log(X)$ et $X_i \in]0+, 4]$ pour X) On remarque que les estimateurs basés sur la régression de Y_i sur $\log(X_i)$ sont bien plus réguliers, quasiment linéaires.

La transformation $\log(X)$ a permis de linéariser la zone à forte densité. C'est ce que l'on a remarqué au §2.1.

3. Etude de la densité μ des ξ_i

3.1 A partir du jeu de données Data1

3.1.1 Distribution approximative de $\tilde{\xi}_i$

```
##      X.1      X      Y1
## Min.   : 1.0   Min.   :0.000005 Min.   : -0.2244
## 1st Qu.: 250.8 1st Qu.:0.234186 1st Qu.: 0.2545
## Median : 500.5 Median :1.035451 Median : 0.4186
## Mean   : 500.5 Mean   :1.997154 Mean   : 0.5045
## 3rd Qu.: 750.2 3rd Qu.:3.332095 3rd Qu.: 0.6604
## Max.   :1000.0 Max.   :8.707688 Max.   : 2.9446
```

On a la représentation suivante $Y_i - r(X_i) = \sigma \xi_i$ (cas homoscédastique σ est constant)

Par définition $\tilde{\xi}_i = Y_i - \hat{r}(X_i)$ où $\hat{r}(x)$ est un estimateur de $r(x)$.

La distribution approximative de $\tilde{\xi}_i$ est celle de ξ_i à la constante multiplicative près σ .

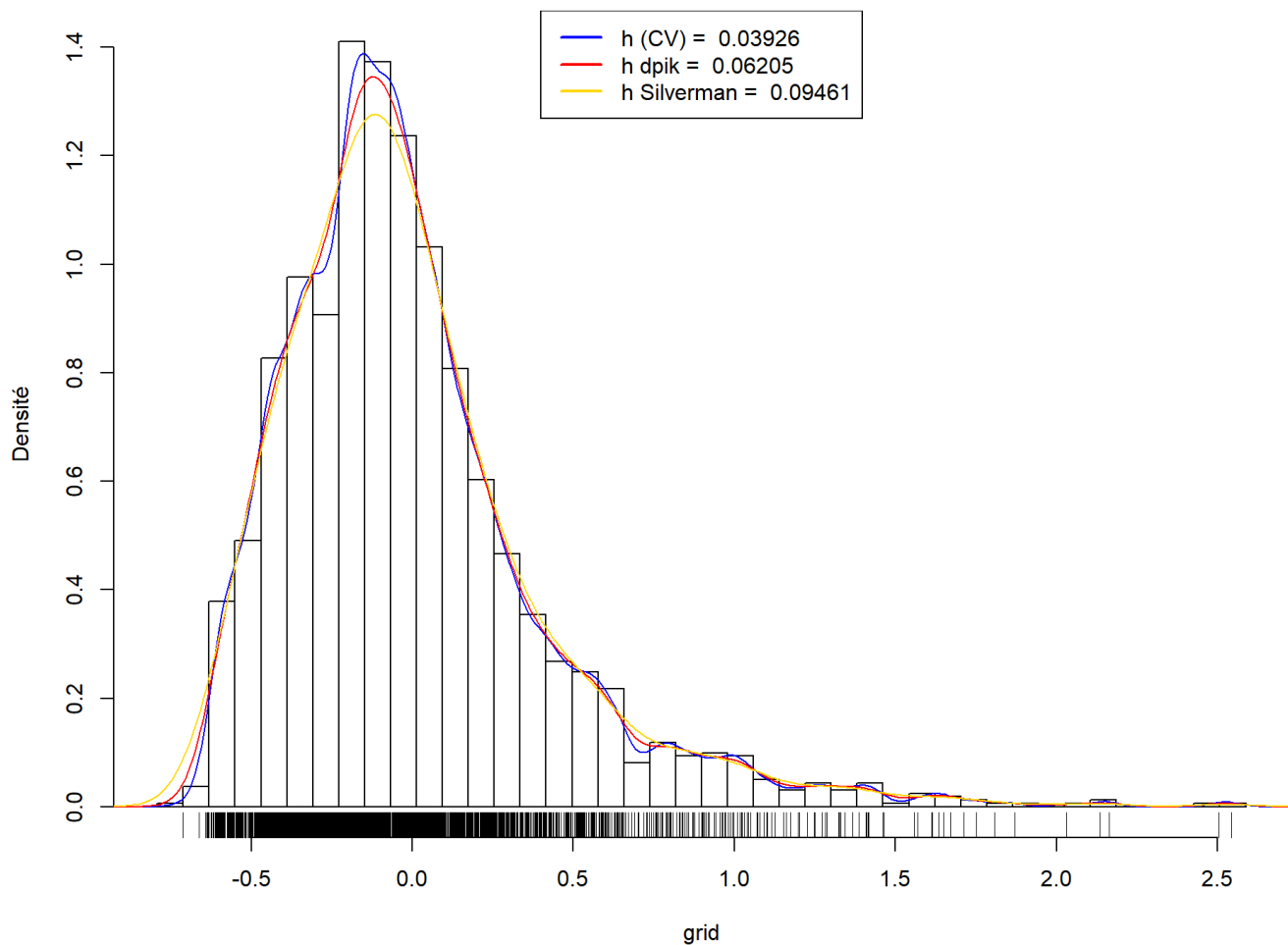
3.1.2 Représentation de la densité $\mu(x)$ des ξ_i

A partir du h établi à la question 2.2: $h_dpik=0.2186849$ et de l'estimateur \hat{r}_h on calcule un h optimal pour $Y_i - \hat{r}_h(X_i)$ On obtient:

```
## [1] "h_dpik : 0.0620479371982669 h_silver : 0.0946066036212771 h_density ; 0.0638864271238886 h_ucv ; 0.0392636826545091"
```

On estime alors la densité μ avec la fonction `bkde` de R.

Histogramme et Estimateurs de la densité μ de ξ pour différentes fenêtres: h



3.1.3. Interêt d'avoir decoupé le jeu de donnees selon J+ et J-

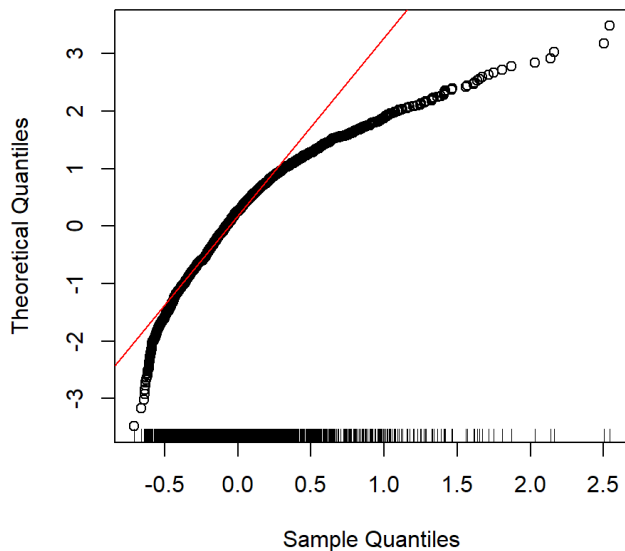
On a ainsi un jeu de données d'apprentissage et de test. On peut utiliser le jeu de données d'apprentissage pour estimer et construire nos estimateurs, le jeu de test pour calculer une erreur de prédiction. A partir de cette erreur de prédiction on a un critère pour choisir le meilleur estimateurs

3.1.4. La densité μ peut-elle être gaussienne

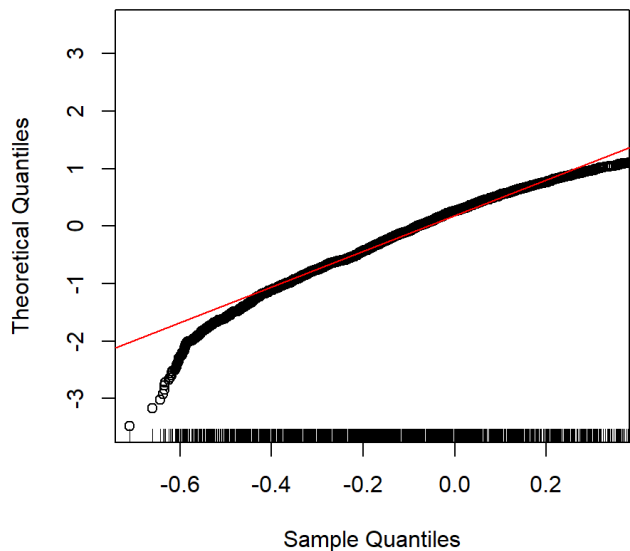
A la vue des graphiques de densité, on a trop de dissymétrie pour avoir une gaussienne. On va le préciser avec le protocole empirique de verification suivant:

- 1. test du QQPlot

Q-Q plot pour la loi μ



Q-Q plot pour la loi μ quantile 85% $q=0.337$



Le QQPlot, graphique d'adéquation des quantiles rejette l'hypothèse de normalité si l'on regarde la globalité de l'échantillon. C'est moins sûr si l'on regarde le sous ensemble qui correspond au quantile 85% qui vaut 0.337 (2ème graphique).

- 2. test de shapiro

```
##  
## Shapiro-Wilk normality test  
##  
## data: estimMu  
## W = 0.89345, p-value < 2.2e-16
```

Le test de Shapiro-Wilk donne une p-value < 2.2e-16. L'hypothèse de normalité est rejetée.

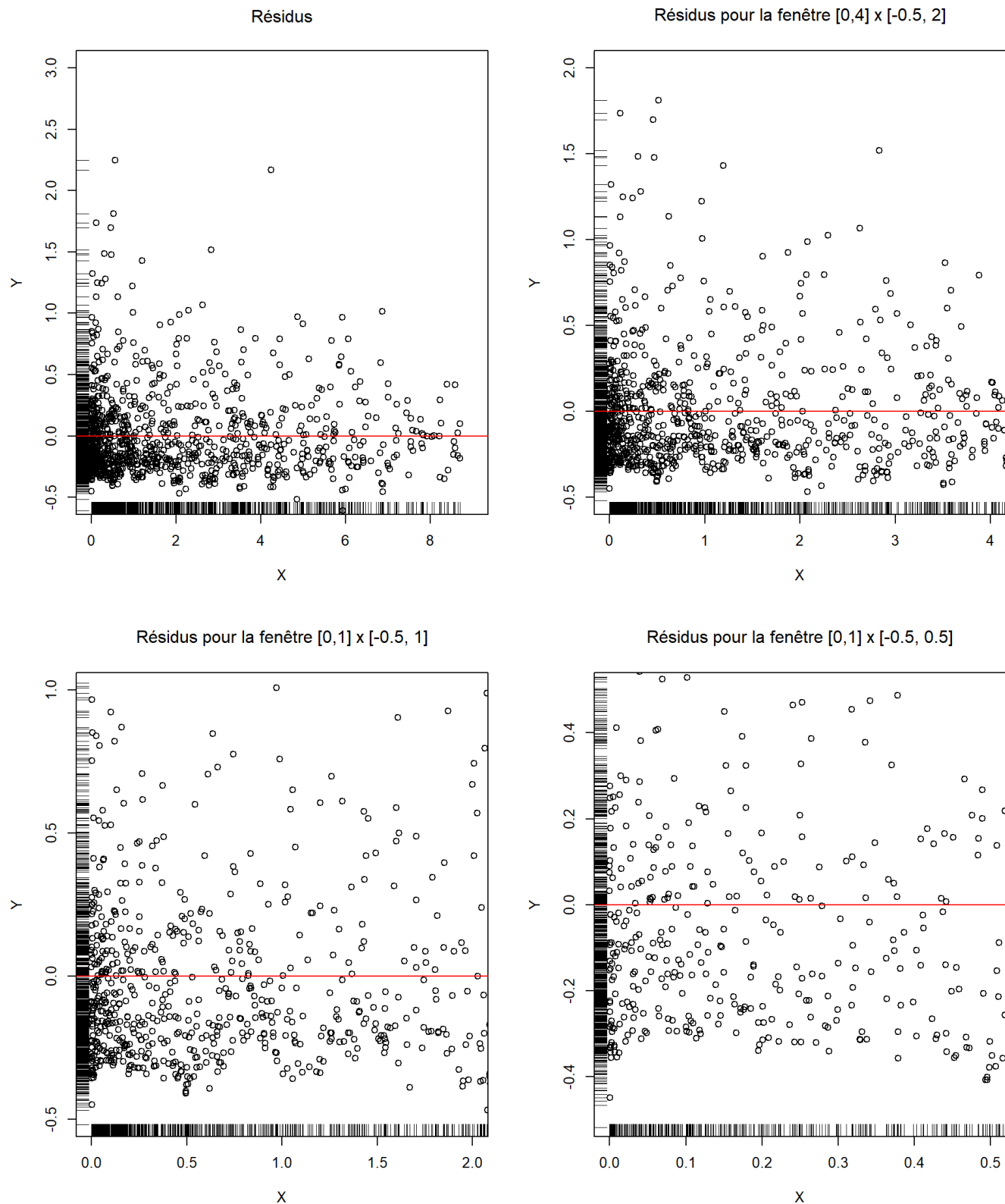
- 3. test de Kolmogorov-Smirnoff

```
##  
## One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
##  
## data: estimMu  
## D = 0.10503, p-value < 2.2e-16  
## alternative hypothesis: two-sided
```

la p-value n'est pas significative l'hypothèse de normalité est rejetée. La densité μ n'est donc pas gaussienne.

3.1.5. homoscédasticité du modèle

Pour tester que le modèle est bien homoscédastique, on peut tracer un graphe des résidus.



On ne remarque pas de structures particulières ou de tendances. La répartition est assez uniforme, en particuliers dans la zone de forte densité (proche de $x=0$). Ce qui nous amène à penser que l'hypothèse d'homoscédasticité est bien vérifiée.

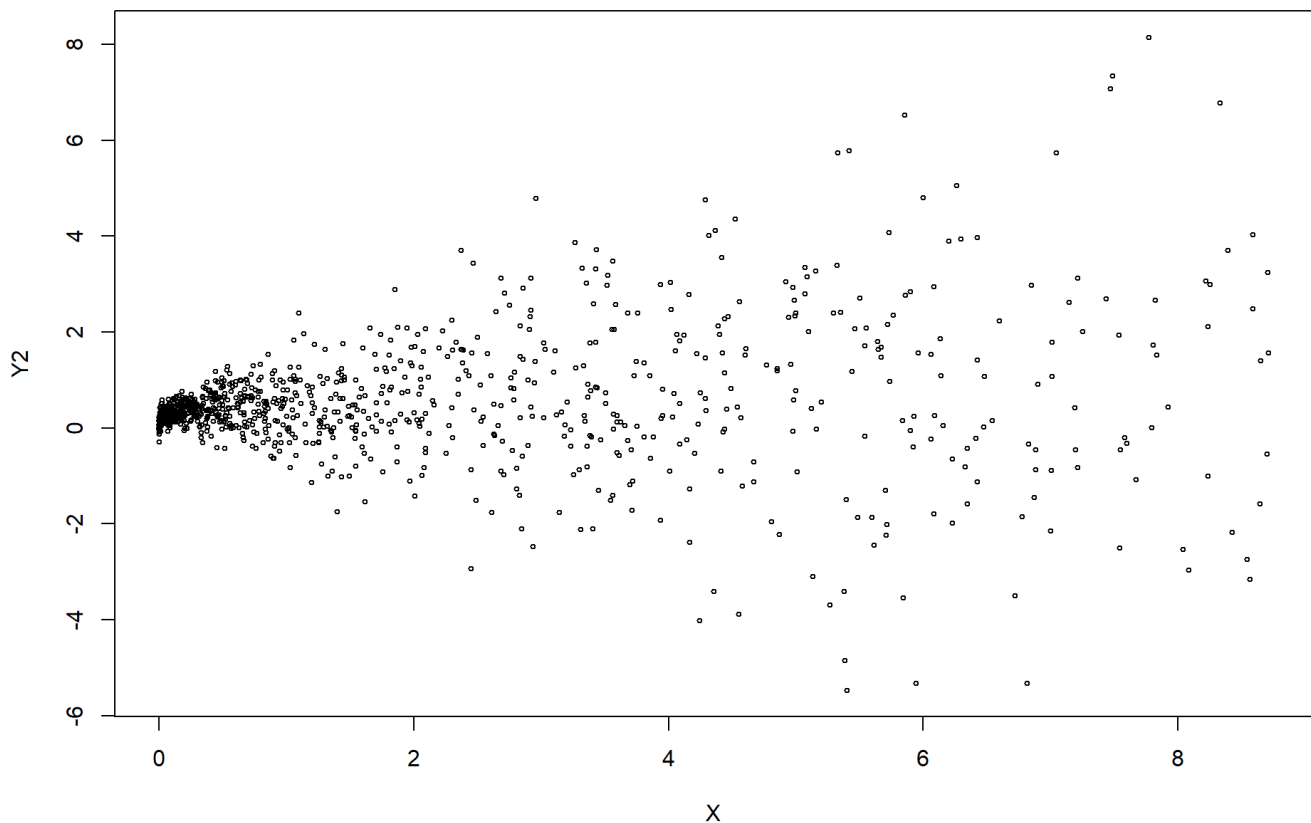
3.2 A partir du jeu de données Data2

On cherche à estimer μ et σ^2 . Pour cela, on coupe à nouveau l'échantillon en deux et on considère à nouveau $\tilde{\xi}_i$

```
summary(d2)
```

```
##      X.1      X      Y2
## Min.   : 1.0   Min.   :0.000005 Min.   : -5.46738
## 1st Qu.: 500.8 1st Qu.:0.258074 1st Qu.: 0.08333
## Median :1000.5 Median :1.192414 Median : 0.35947
## Mean   :1000.5 Mean   :2.029447 Mean   : 0.53951
## 3rd Qu.:1500.2 3rd Qu.:3.318174 3rd Qu.: 0.87849
## Max.   :2000.0 Max.   :9.308684 Max.   :10.15297
```

Jeux de données Data2 observations X en abscisse et Y2 en ordonnée.



3.2.1. Justifier qu'en régressant ξ_i sur X_i on obtient un estimateur de σ^2

Par définition $\tilde{\xi}_i = Y_i - \hat{r}(X_i)$ où $\hat{r}(x)$ est un estimateur de $r(x)$.

Ainsi $\tilde{\xi}_i^2 = (Y_i - \hat{r}(X_i))^2$

En remplaçant par l'expression de $Y_i = r(X_i) + \sigma(X_i)\xi_i$ on obtient $\tilde{\xi}_i^2 = (r(X_i) + \sigma(X_i)\xi_i - \hat{r}(X_i))^2$

Puis en développant $\tilde{\xi}_i^2 = (r(X_i) - \hat{r}(X_i))^2 + \sigma(X_i)^2\xi_i^2 + 2(r(X_i) - \hat{r}(X_i))\sigma(X_i)\xi_i$

On conditionne par rapport à X_i et on utilise l'hypothèse d'indépendance de ξ_i

$$E(\tilde{\xi}_i^2 | X_i) = E((r(X_i) - \hat{r}(X_i))^2 | X_i) + E(\sigma(X_i)^2 | X_i)E(\xi_i^2) + 2E((r(X_i) - \hat{r}(X_i))\sigma(X_i)\xi_i | X_i)E(\xi_i)$$

Par hypothèse $E(\xi_i) = 0$ et $E(\xi_i^2) = 1$ on a donc finalement: $E(\tilde{\xi}_i^2 | X_i) = E((r(X_i) - \hat{r}(X_i))^2 | X_i) + E(\sigma(X_i)^2 | X_i)$

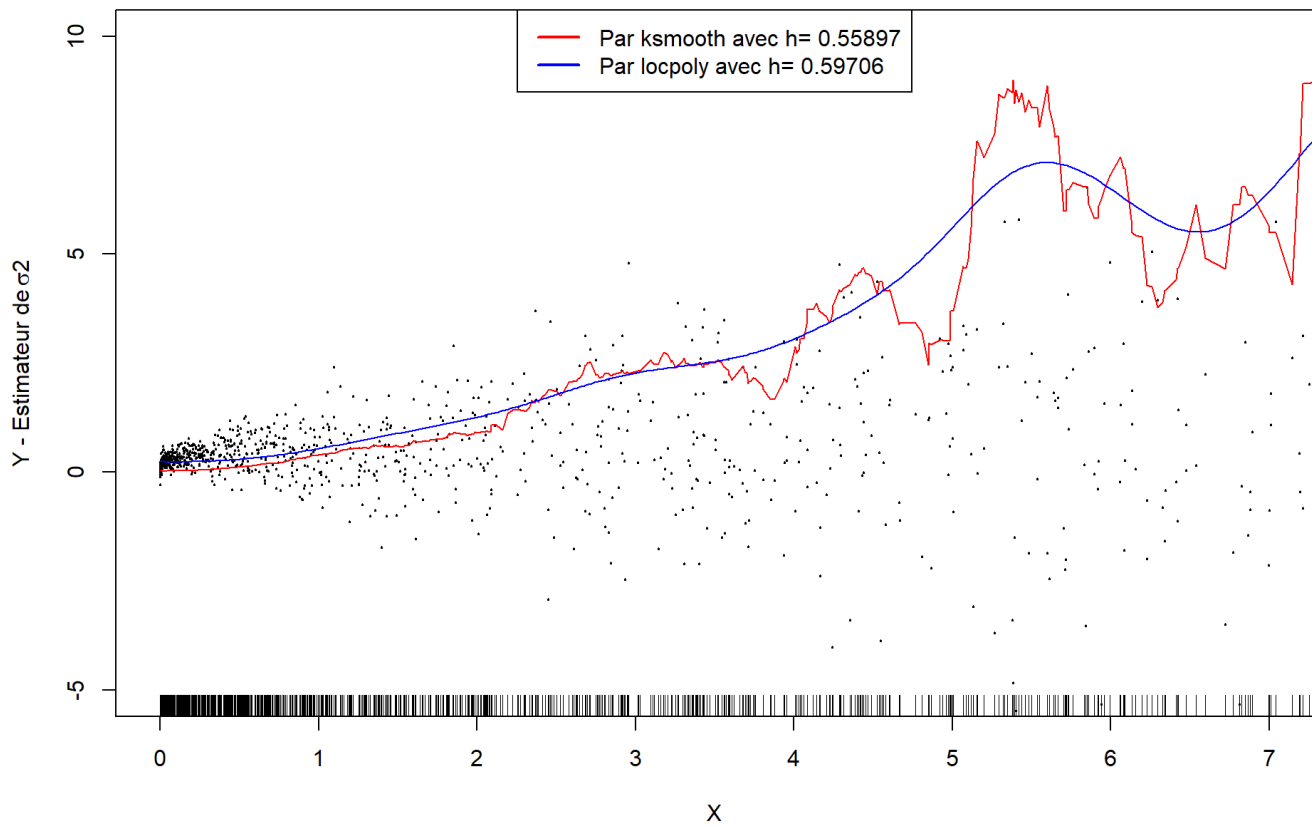
Ce qui donne $E(\tilde{\xi}_i^2 | X_i) = (r(X_i) - \hat{r}(X_i))^2 + \sigma(X_i)^2$

Comme $\hat{r}(X_i)$ est un estimateur de $r(X_i)$ on a bien le résultat.

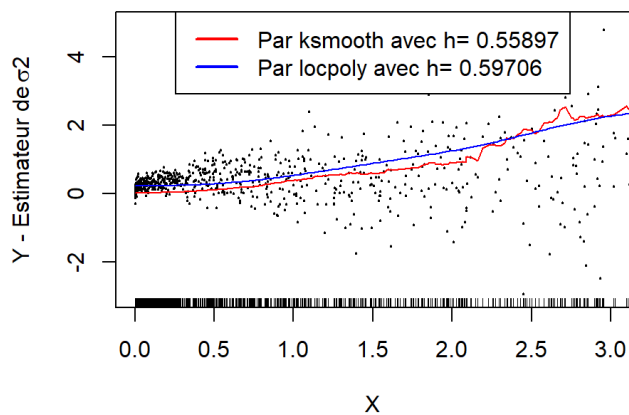
Implémentation et visualisation

A partir de l'estimateur $\hat{r}(X_i)$ on va construire un estimateur de $\sigma(X_i)^2$. Pour cela on construit un estimateur en regressant sur X_i le carré des résidus: $(Y_i - \hat{r}(X_i))^2$. On utilise la fonction `ksmooth` et `locpoly` (degrès 2).

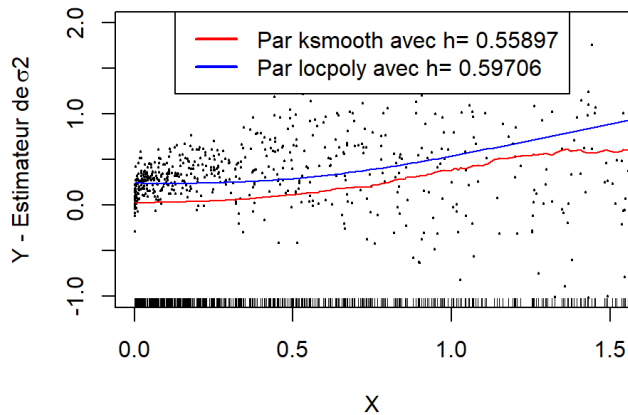
Données de Data2 et estimation de la variance σ^2



Données Data2 et estimation de σ^2 sur $[0,3]$



Données Data2 et estimation de σ^2 sur $[0,1.5]$



En comparant au jeu de données (nuage de points Data2) on retrouve bien le résultat attendu. Peu de variance où la densité est élevée dans l'intervalle $[0+,1]$. Les points sont proches les uns des autres. Ensuite la variance augmente en même temps que la densité des points diminue. Avec un premier saut à partir de $x=2$ puis $x=4$. Ensuite la densité des observations est faible.

3.2.2. La densité μ peut-elle être gaussienne

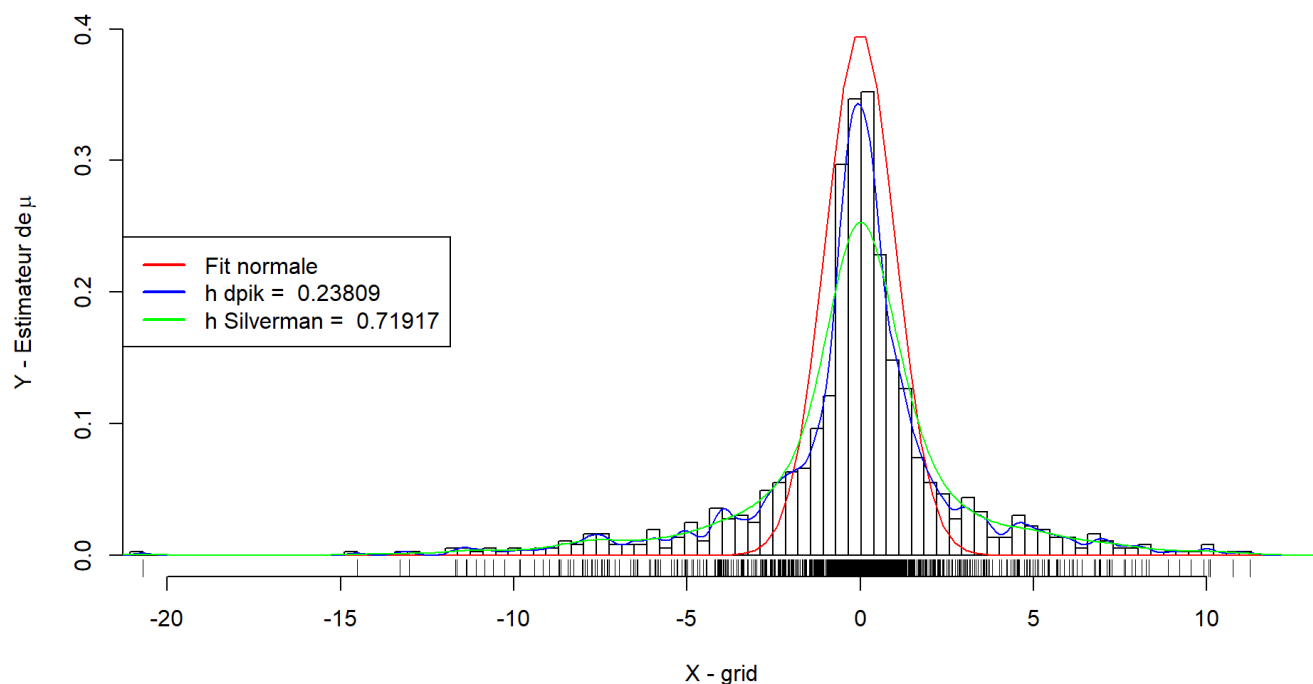
Avant d'appliquer les tests classiques (QQPlot, Test de Shapiro et KS) on va regarder comment se comportent les estimateurs à noyaux gaussiens. On estime la densité μ des ξ_i à partir de l'estimation $(Y_i - \hat{r}(X_i))/\hat{\sigma}^2(X_i)$ où $\hat{\sigma}^2(X_i)$ est l'estimateur de $\sigma^2(X_i)$ obtenu précédemment.

- On recherche tout d'abord le h optimal avec les méthodes habituelles: fonction dpik, règle de Silverman, fonction density, validation croisée.

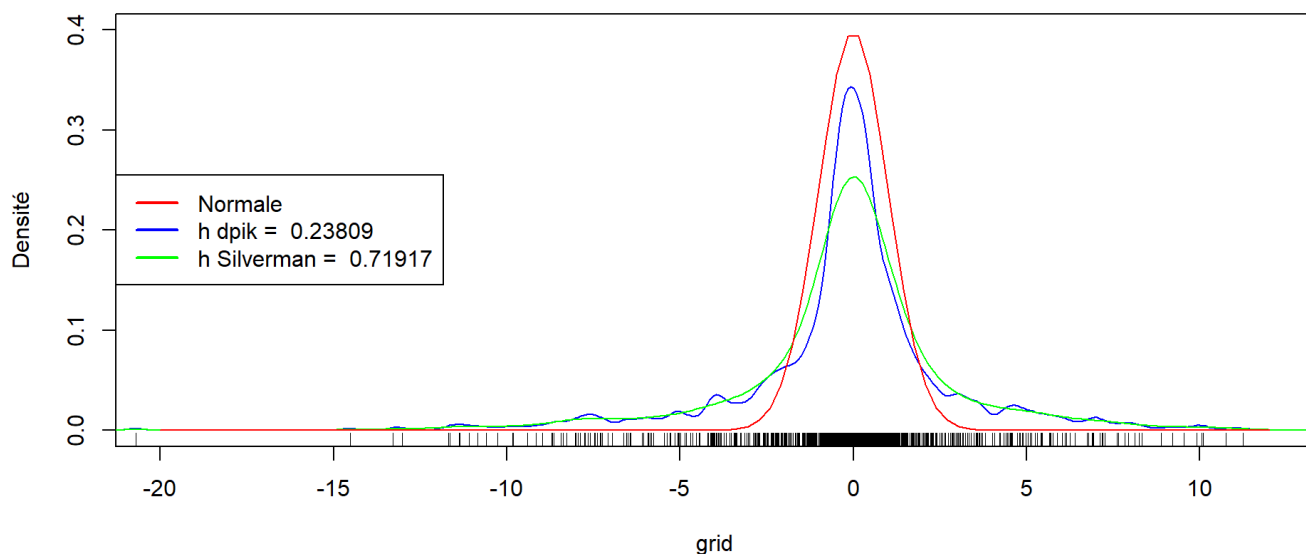
```
## [1] "h_dpik : 0.238094752525185 h_silver : 0.719173399214354 h_density ; 0.313922107129252 h_ucv ; 0.21933468323744"
```

- On estime la densité à partir de la fonction bkde que l'on représente graphiquement:

Histogramme et Estimateurs de la densité μ de ξ pour différentes fenêtres: h - cas hétéroscédastique

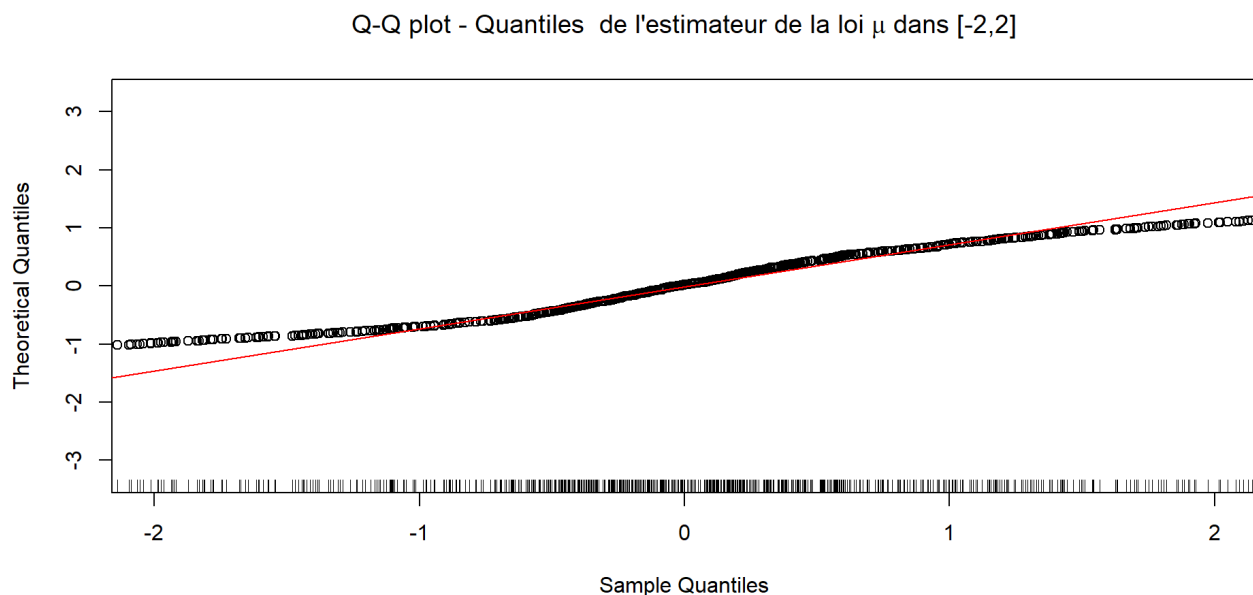
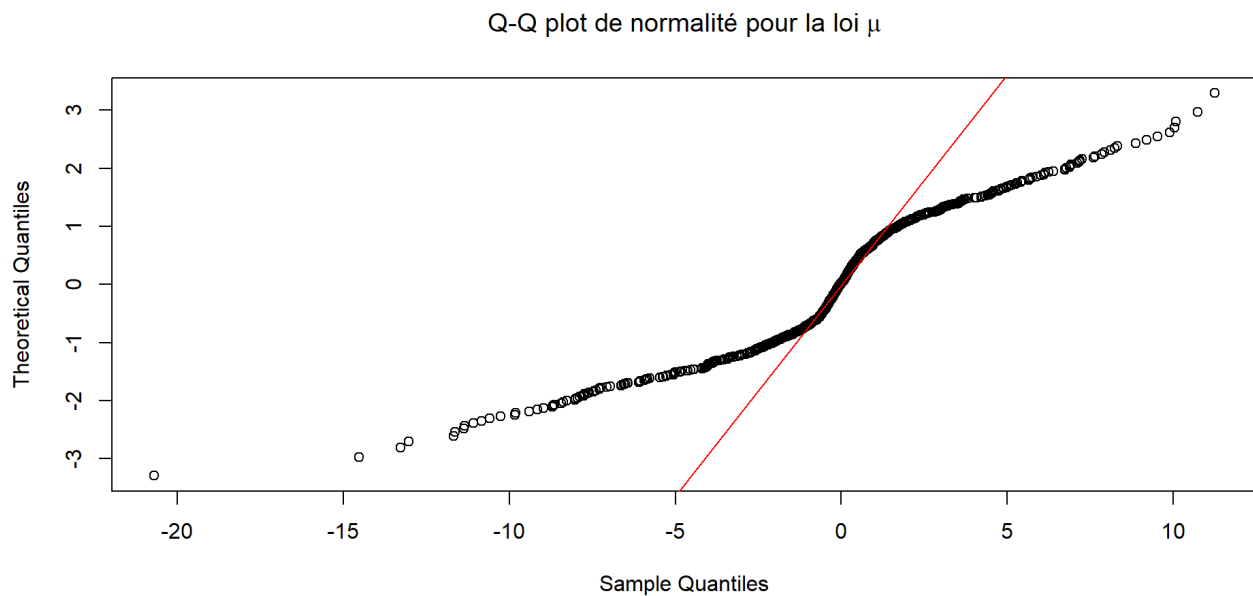


Estimateurs de la densité μ de ξ pour différentes fenêtres: h - cas hétéroscédastique



À la vue des graphiques les estimateurs de la densité μ semblent se rapprocher d'une gaussienne. On a gagné en symétrie et sur la forme générale par rapport au cas précédent étudié au §3.1.4. Maintenant on va vérifier l'hypothèse de normalité des données $(Y_i - \hat{r}(X_i))/\hat{\sigma}^2(X_i)$ avec un QQPlot et des tests.

- 1- test du QQPlot



L'hypothèse de normalité semble rejetée sur la globalité. Mais si on regarde le sous intervalle $[-2,2]$ des quantiles de l'estimation de la loi μ on a une bonne adéquation à la loi normale. De plus sur cette intervalle on a environ 75% des individus (lois quasi symétrique et 2 quantile à 86.5%). Par contre sorti de cette intervalle on diverge rapidement.

- 2- test de Shapiro

```
##
## Shapiro-Wilk normality test
##
## data:  estMu_ks
## W = 0.88679, p-value < 2.2e-16
```

Le test de Shapiro-Wilk donne une p-value significative $< 2.2e-16$. L'hypothèse de normalité est rejetée.

- 3- test de Kolmogorov-Smirnoff

```
##
## One-sample Kolmogorov-Smirnov test
##
## data:  estMu_ks
## D = 0.15787, p-value < 2.2e-16
## alternative hypothesis: two-sided
```

La p-value est significative l'hypothèse de normalité est rejetée. D'après ces derniers tests la densité μ ne peut être gaussienne.