

ECN 6338 Cours 6

Approximation de fonctions

William McCausland

2025-10-10

Survol du cours 6

Approximations locales, basées sur les dérivées en un seul point

- ▶ Approximation de Taylor
- ▶ Approximation de Padé

Expansions basées sur les évaluations sur une grille de points

- ▶ Approximation linéaire par morceaux
- ▶ Approximation de Bernstein
- ▶ Approximation spline cubique d'Hermite

Expansions basées sur les projections

- ▶ Suites de polynômes orthogonaux

L'approximation (locale) de Taylor

- ▶ L'approximation d'une fonction $f(\cdot)$ est autour d'un point x_0 .
- ▶ Elle utilise la valeur $f(x_0)$ et les n premières dérivées $f'(x_0), f''(x_0), \dots, f^{(n)}(x_0)$.
- ▶ L'approximation est

$$\hat{f}(x) = f(x_0) + \sum_{i=1}^n \frac{(x - x_0)^i}{i!} f^{(i)}(x_0).$$

- ▶ Les valeurs de \hat{f} et de ses n premières dérivées coïncident avec celles de f au point x_0 .
- ▶ Quel que soit l'ordre n , l'approximation demeure locale : il existe une fonction $h_n(x)$ telle que

$$f(x) - \hat{f}(x) = h_n(x - x_0) \cdot (x - x_0)^n \text{ et } \lim_{x \rightarrow x_0} h_n(x) = 0.$$

L'approximation (locale) Padé

- ▶ L'approximation Padé \hat{f} de f , comme celle de Taylor,
 - ▶ utilise la valeur de f et de ses premières n dérivées à x_0 ,
 - ▶ concorde avec f sur ces valeurs,
 - ▶ comporte $n + 1$ coefficients libres.
- ▶ L'approximation est une fonction rationnelle, un ratio de polynômes :

$$f(x) \approx r(x) \equiv \frac{p(x)}{q(x)} = \frac{p_0 + p_1(x - x_0) + \dots + p_m(x - x_0)^m}{1 + q_1(x - x_0) + \dots + q_d(x - x_0)^d},$$

où $m + d = n$ et souvent $m = d$ ou $m = d + 1$.

- ▶ La condition $f^i(x_0) = r^i(x_0)$, $i = 0, 1, \dots, m + n$ s'exprime aussi comme

$$p^i(x) - (f \cdot q)^i(x) = 0, \quad i = 0, 1, \dots, m + d,$$

$n + 1$ équations pour trouver $n + 1 = (m + 1) + d$ coefficients.

Calcul de l'approximation Padé (2,1) de e^x autour de $x = 0$

- L'approximation $r(x)$ est

$$r(x) = \frac{p_0 + p_1x + p_2x^2}{1 + q_1x} = \frac{1 + \frac{2}{3}x + \frac{1}{6}x^2}{1 - \frac{1}{3}x}.$$

- Les coefficients p_0 , p_1 , p_2 et q_1 sont donnés par

$$\left[(p_0 + p_1x + p_2x^2) - e^x(1 + q_1x) \right]_{x=0} = p_0 - 1 = 0,$$

$$[(p_1 + 2p_2x) - e^x(1 + q_1x) - e^x q_1]_{x=0} = p_1 - 1 - q_1 = 0,$$

$$[2p_2 - e^x(1 + q_1x) - 2e^x q_1]_{x=0} = 2p_2 - 1 - 2q_1 = 0,$$

$$[-e^x(1 + q_1x) - 3e^x q_1]_{x=0} = -1 - 3q_1 = 0.$$

- La première équation donne $p_0 = 1$; la dernière, $q_1 = -\frac{1}{3}$.
- Ensuite, la deuxième équation donne $p_1 = 1 + q_1 = \frac{2}{3}$; la troisième, $p_2 = \frac{1}{2} + q_1 = \frac{1}{6}$.

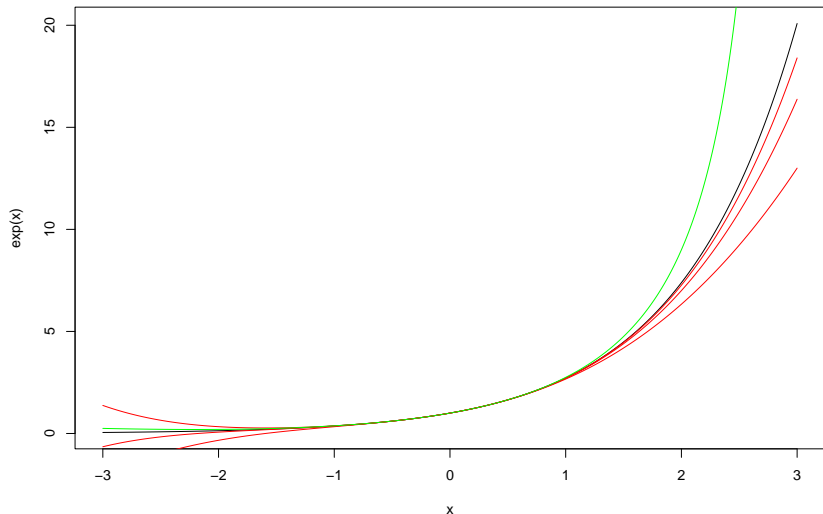
Notes sur l'approximation Padé

- ▶ L'approximation est souvent meilleure que l'approximation de Taylor en pratique.
- ▶ Il convient de prêter attention aux zéros de $q(x)$ où l'approximation n'est pas bien définie. Dans l'exemple, $q(x)$ n'est pas bien définie à $x = 3$.

Exemple I, Taylor et Padé, $f(x) = e^x$, $x_0 = 0$.

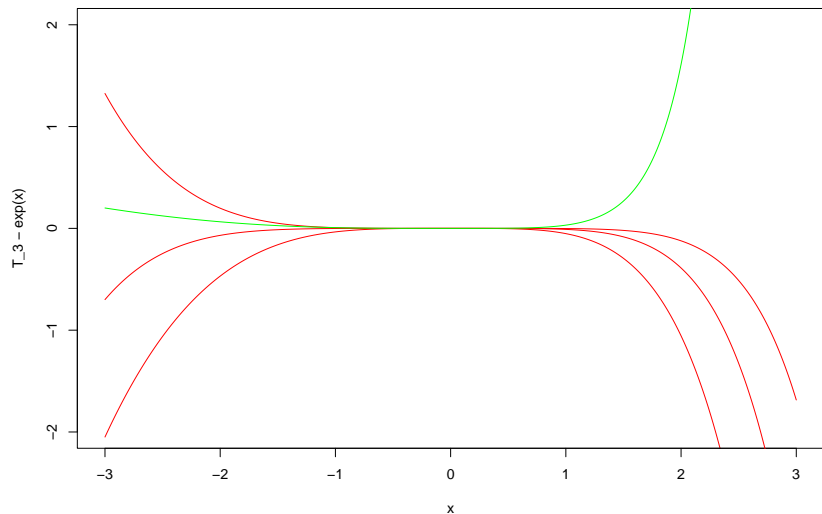
Approx. de Taylor (ordres 3, 4, 5, rouge), de Padé ((2,1), vert) :

```
source('../Taylor_Pade_exp.R')
```



Exemple I, erreurs d'approximation

```
source('../Taylor_Pade_exp_error.R')
```



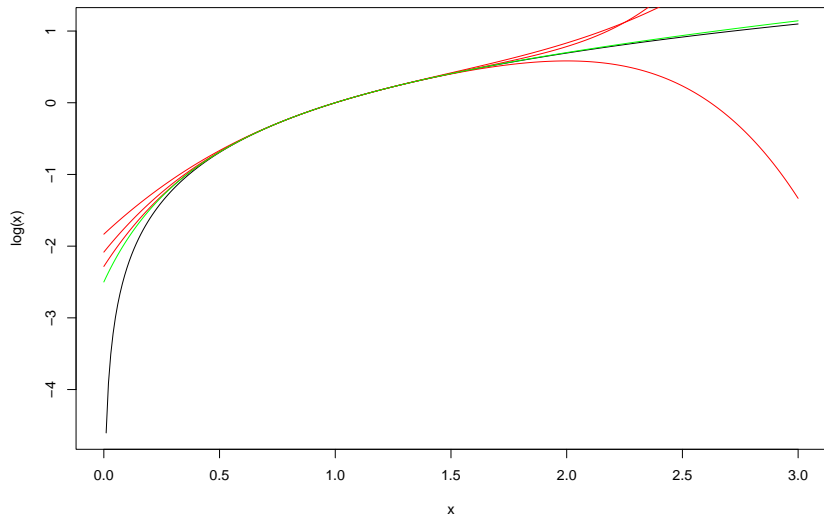
Exemple II, approximation de $f(x) = \log x$ à $x_0 = 1$

L'approximation Padé d'ordre (2,1) est

$$r(x) = \frac{-\frac{5}{2} + 2x + \frac{1}{2}x^2}{1 + 2x}.$$

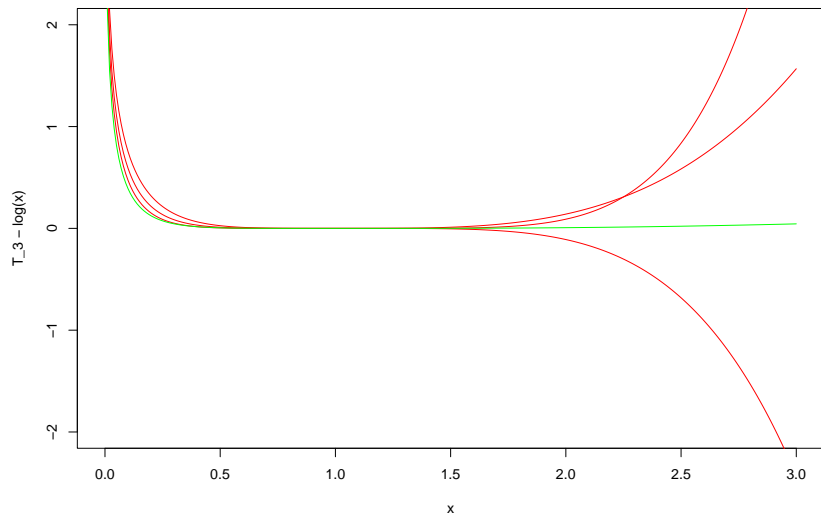
Exemple II, Taylor et Padé, $f(x) = \log x$, $x_0 = 1$.

```
source(' ../Taylor_Pade_log.R')
```



Exemple II, erreurs d'approximation

```
source('../Taylor_Pade_log_error.R')
```



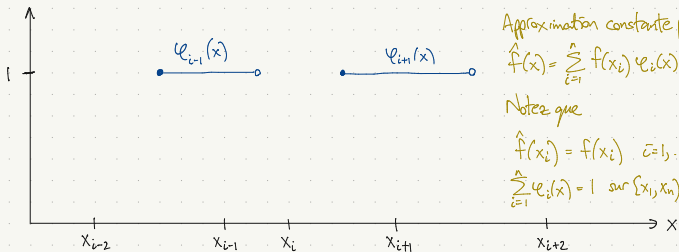
Les approximations fondée sur des évaluations en une grille

- ▶ Nous abordons maintenant les approximations fondées sur des évaluations en une grille de points :
 - ▶ approximation constante par morceaux
 - ▶ approximation linéaire par morceaux
 - ▶ approximation de Bernstein (non interpolante)
 - ▶ approximation par spline cubique d'hermite
- ▶ Les trois premiers utilisent les évaluations $f(x_1), \dots, f(x_n)$ sur une grille x_1, \dots, x_n et les approximations $\hat{f}(x)$ sur $[x_1, x_n]$ prennent la forme

$$\hat{f}(x) = \sum_{i=1}^n f(x_i) \varphi_i(x).$$

- ▶ Deux propriétés possibles :
 - ▶ partition d'unité : $\sum_{i=1}^n \varphi_i(x) = 1$ pour $x \in [x_1, x_n]$
 - ▶ interpolation : $\hat{f}(x_i) = f(x_i)$ pour $i = 1, \dots, n$.

Approx. constante par morceaux et linéaire par morceaux



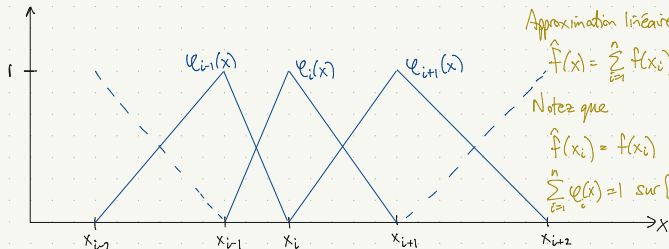
Approximation constante par morceaux

$$\hat{f}(x) = \sum_{i=1}^n f(x_i) \varphi_i(x)$$

Noter que

$$\hat{f}(x_i) = f(x_i) \quad i=1, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^n \varphi_i(x) = 1 \text{ sur } [x_1, x_n], \hat{f} \text{ discontinue}$$



Approximation linéaire par morceaux

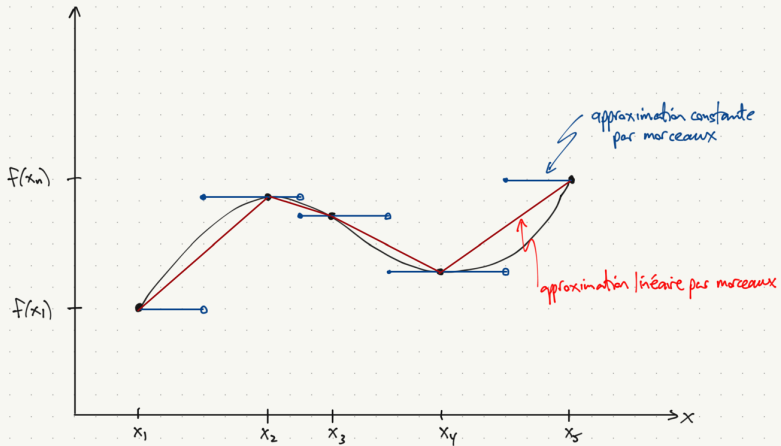
$$\hat{f}(x) = \sum_{i=1}^n f(x_i) \varphi_i(x)$$

Noter que

$$\hat{f}(x_i) = f(x_i) \quad i=1, \dots, n$$

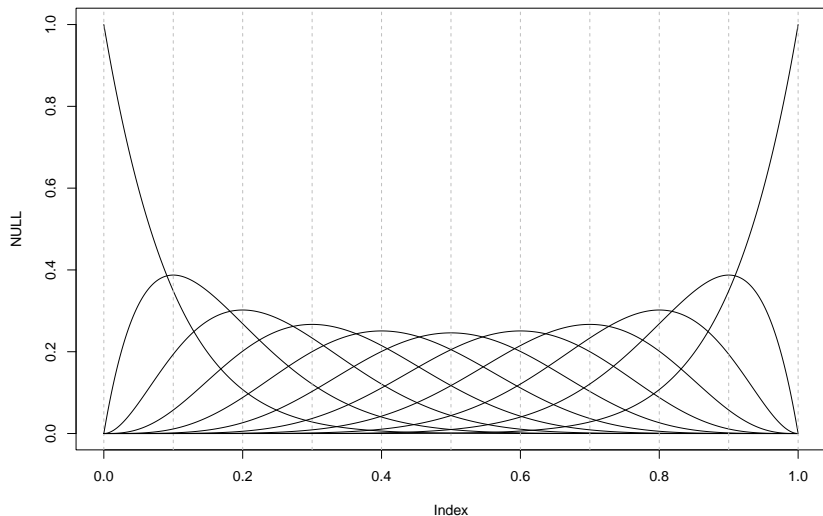
$$\sum_{i=1}^n \varphi_i(x) = 1 \text{ sur } [x_1, x_n], \hat{f} \in C^1$$

Approximations par morceaux



Polynômes de Bernstein d'ordre $n = 10$

```
source('../Bernstein.R')
```



Approximation de Bernstein

- ▶ Approximation d'une fonction continue $g: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$.
- ▶ On normalise à $f: [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ avec $f(x) \equiv g(a + x(b - a))$.
- ▶ L'approximation d'ordre n utilise les évaluations de f sur une grille $(0, \frac{1}{n}, \dots, \frac{n-1}{n}, 1)$.
- ▶ L'approximation est

$$\hat{f}_n(x) = \sum_{i=0}^n f\left(\frac{i}{n}\right) b_{i,n}(x),$$

où $b_{i,n}(x)$ est le i -ième polynôme de Bernstein de degré n :

$$b_{i,n}(x) = \binom{n}{i} x^i (1-x)^{n-i}.$$

Propriétés de l'approximation de Bernstein

- ▶ $b_{i,n}(x)$, $i = 0, 1, \dots, n$ est une partition d'unité sur $[0, 1]$.
- ▶ Convergence uniforme : $\lim_{n \rightarrow \infty} \sup_{x \in [0,1]} |f(x) - \hat{f}_n(x)| = 0$.
- ▶ \hat{f} n'est pas une interpolation de f : $\hat{f}(\frac{i}{n}) \neq f(\frac{i}{n})$ en général.
- ▶ La convergence est lente, mais les dérivées continues existantes convergent également.

Interprétations probabilistes

- ▶ $(n+1)b_{i,n}(x)$ est la densité $\text{Beta}(i+1, n-i+1)$ sur $[0, 1]$.
- ▶ Pour $\pi_i \geq 0$, $i = 0, 1, \dots, n$, $\sum_{i=0}^n \pi_i = 1$, la fonction suivante est une densité, un mélange de densités Beta :

$$g(x) = (n+1) \sum_{i=0}^n \pi_i b_{i,n}(x).$$

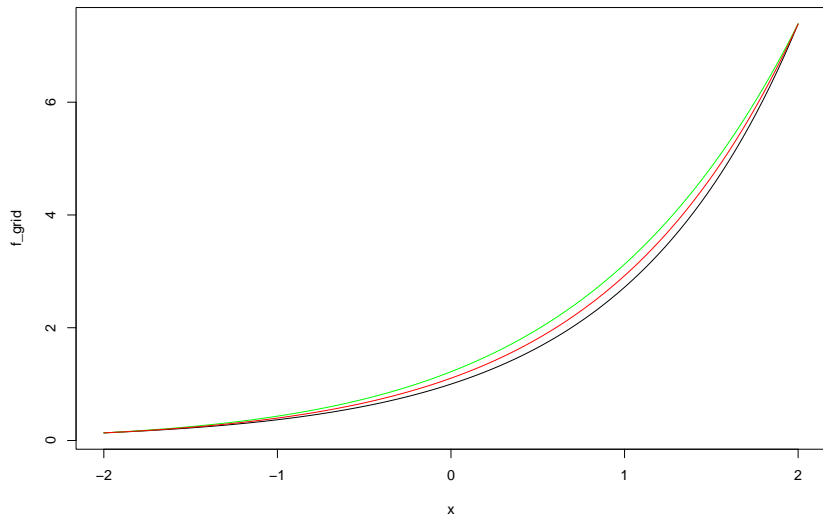
- ▶ Soit $G(x) = \int_0^x g(t) dt$, la fonction de répartition, un polynôme d'ordre $n+1$.
- ▶ Pour une fonction de répartition paramétrique $F(x)$ sur $(-\infty, \infty)$, $H(x) = G(F(x))$ est une autre fonction de répartition sur $(-\infty, \infty)$.
- ▶ La densité est $h(x) = g(F(x))f(x)$.
- ▶ Spécifier F et G revient à définir une loi non paramétrique, une perturbation flexible de la loi avec fonction de répartition $F(x)$.

Approximation de $g(x) = e^x$ sur l'intervalle $[-2, 2]$

```
# On normalise la fonction g:[-2,2] -> R, où g(x) = exp(x).  
# à la fonction f:[0,1] -> R, où f(t) = g(-2 + 4*t)  
f <- function(t) {exp(-2 + 4*t)}  
  
# Grille de points t in [0,1]  
t <- seq(0, 1, by=0.01)  
  
# Grille de points x in [-2,2]  
x <- -2 + 4*t  
  
# Valeurs de f et de g sur la grille  
f_grid <- f(t)
```

Approximation de Bernstein de $g(x) = e^x$ pour $n = 10, 20$

```
plot(x, f_grid, type='l')  
lines(x, bernstein(f, 10, t), col='green')  
lines(x, bernstein(f, 20, t), col='red')
```



Splines cubiques d'hermite

Les splines d'Hermite permettent une interpolation lisse tenant compte des dérivées.

Quatre fonctions cubiques sur l'intervalle $[0, 1]$:

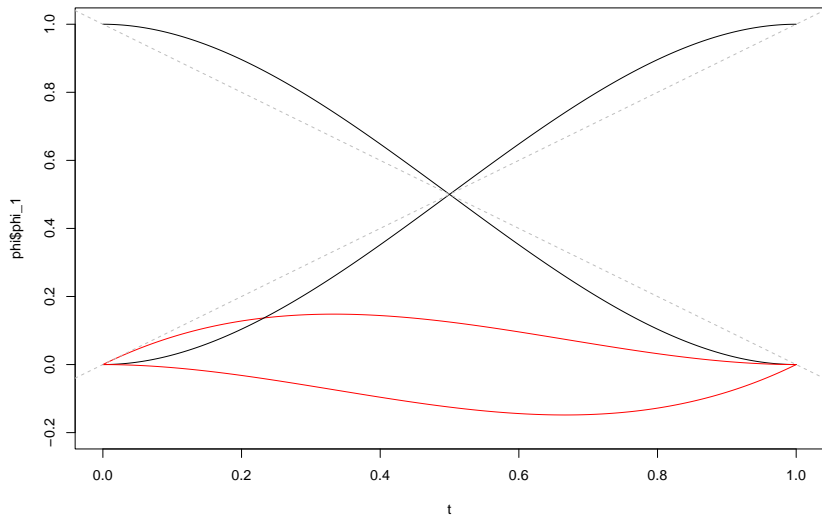
$$\varphi_1(t) = 2t^3 - 3t^2 + 1, \quad \varphi_2(t) = t^3 - 2t^2 + t,$$

$$\varphi_3(t) = -2t^3 + 3t^2, \quad \varphi_4(t) = t^3 - t^2.$$

Fonction f	$f(0)$	$f'(0)$	$f(1)$	$f'(1)$
φ_1	1	0	0	0
φ_2	0	1	0	0
φ_3	0	0	1	0
φ_4	0	0	0	1
$a_1\varphi_1 + a_2\varphi_2 + a_3\varphi_3 + a_4\varphi_4$	a_1	a_2	a_3	a_4

Graphique, spline cubiques d'hermite

```
source('../Hermite_piece.R')
```



Notes, splines cubiques d'hermite

- ▶ Problème : interpoler une fonction dont la valeur et la dérivée sont spécifiées à quelques points.
- ▶ Les données d'entrée :
 - ▶ des points $x_1 < x_2 < \dots < x_n$,
 - ▶ des valeurs $f(x_1), \dots, f(x_n)$,
 - ▶ et les dérivées $f'(x_1), \dots, f'(x_n)$.
- ▶ Le résultat : une fonction
 - ▶ cubique par morceaux $[x_i, x_{i+1}]$, (piecewise cubic function)
 - ▶ C^1 dans l'intervalle $[x_1, x_n]$,
 - ▶ ayant une deuxième dérivée discontinue à chaque x_i .
- ▶ Il faut adapter les fonctions $\varphi_j: [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$, $j = 1, 2, 3, 4$, pour obtenir les fonctions $\varphi_j: [x_i, x_{i+1}] \rightarrow \mathbb{R}$.
- ▶ Il y a une version (rarement utilisée) avec six fonctions quintiques d'hermite qui donne une fonction C^2 à partir des valeurs, des premières dérivées et des deuxième dérivées à un ensemble de points.

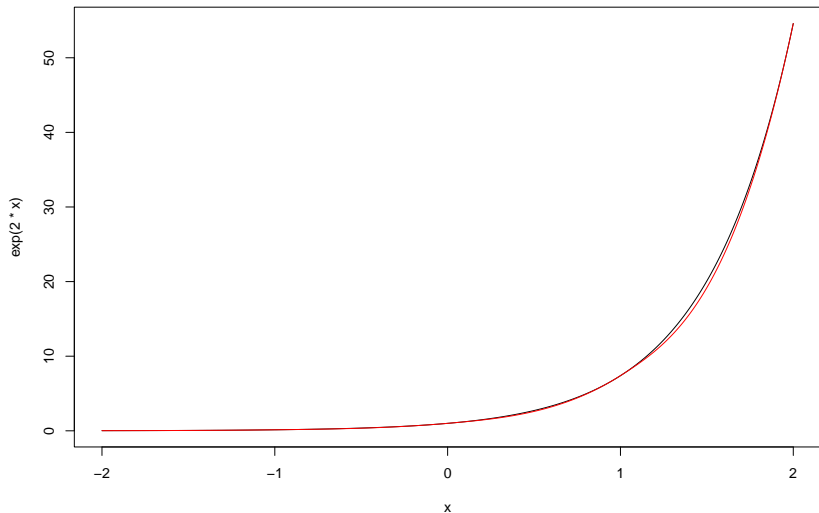
Évaluation des splines cubiques d'hermite

```
sp_cub_h <- function(x, x_g, f_g, fp_g)
{
  i <- findInterval(x, x_g)
  t <- (x - x_g[i]) / (x_g[i+1] - x_g[i])
  t2 <- t*t; t3 <- t2*t
  fch <- f_g[i] * (2*t3 - 3*t2 + 1) +
    fp_g[i] * (t3 - 2*t2 + t) +
    f_g[i+1] * (-2*t3 + 3*t2) +
    fp_g[i+1] * (t3 - t2)
}

x_grid <- seq(-2, 3, by=1)
f_grid <- exp(2*x_grid)
fp_grid <- 2*f_grid
x <- array(seq(-2, 2, by=0.01))
f_approx <- apply(x, 1, sp_cub_h, x_grid, f_grid, fp_grid)
```

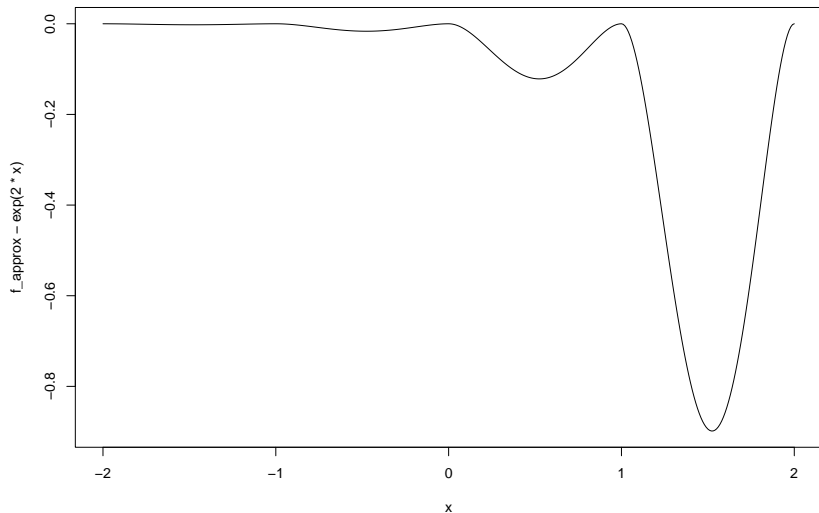

Évaluation des splines cubiques d'hermite (suite)

```
plot(x, exp(2*x), 'l', col='black')  
lines(x, f_approx, col='red')
```



Évaluation des splines cubiques d'hermite (erreur)

```
plot(x, f_approx - exp(2*x), 'l', col='black')
```



Aparté sur MCO

- ▶ Moindres carrés ordinaire (MCO), rappel :
 - ▶ X est $n \times K$, y est $n \times 1$.
 - ▶ Problème MCO : $b = \arg \min_{\beta} (y - X\beta)^{\top} (y - X\beta)$.
 - ▶ Solution : $b = (X^{\top} X)^{-1} (X^{\top} y)$.
 - ▶ $\hat{y} \equiv Xb = (X(X^{\top} X)^{-1} X^{\top})y$ approxime y (\hat{y} est la combinaison linéaire des colonnes de X le plus près de y).
- ▶ La matrice $M = X(X^{\top} X)^{-1} X^{\top}$ de “projection” :
 - ▶ Prenons une combinaison linéaire Xa des colonnes de X .
 - ▶ Multiplication par M ne change pas Xa :

$$M(Xa) = X(X^{\top} X)^{-1} X^{\top} Xa = Xa.$$

- ▶ Prenons $u \in \mathbb{R}^n$ perpendiculaire à toutes les colonnes de X :

$$Mu = X(X^{\top} X)^{-1} X^{\top} u = X(X^{\top} X)^{-1} 0 = 0.$$

- ▶ M projette un vecteur $n \times 1$ sur l'espace engendré par les colonnes de X .
- ▶ $\hat{y} = My$ est la projection de y sur cet espace.

X avec colonnes orthogonales

- Supposons que les colonnes de X soient orthogonales. (Pas réaliste pour les données observées, possible dans le cas où X est une matrice de conception pour une expérience.)
- Alors,

$$X^{\top}X = \begin{bmatrix} x_1^{\top}x_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & x_2^{\top}x_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & x_K^{\top}x_K \end{bmatrix}, \quad X^{\top}y = \begin{bmatrix} x_1^{\top}y \\ x_2^{\top}y \\ \vdots \\ x_K^{\top}y \end{bmatrix}.$$

$$b_k = \frac{x_k^{\top}y}{x_k^{\top}x_k}, \quad k = 1, \dots, K; \quad \hat{y} = Xb = \sum_{k=1}^K \frac{x_k^{\top}y}{x_k^{\top}x_k} x_k.$$

- Chaque $\frac{x_k^{\top}y}{x_k^{\top}x_k} x_k$ est la projection de y sur x_k .
- Notez bien les produits intérieurs $x_k^{\top}y$, $x_k^{\top}x_k$.

MCO avec colonnes orthogonales et l'approximation par projection

MCO	Approximation par projection
vecteur y	fonction $f(\cdot)$
valeurs prédites \hat{y}	approximation $\hat{f}(\cdot)$
vecteurs $x_k, k = 1, \dots, K$	polynômes $\phi_k(\cdot), k = 1, \dots, K$
produit intérieur $x_k^\top y$	produit intérieur $\langle \phi_k, f \rangle$
colonnes orthogonales $x_k^\top x_l = 0$	polynômes orthogonales $\langle \phi_k, \phi_l \rangle = 0.$
projection de y sur $x_k : \frac{x_k^\top y}{x_k^\top x_k} x_k$	projection de f sur $\phi_k(\cdot) : \frac{\langle \phi_k, f \rangle}{\langle \phi_k, \phi_k \rangle} \phi_k(\cdot)$

Familles de polynômes orthogonaux : produits intérieurs

- Il y a plusieurs produits intérieurs pour les fonctions, y compris

$$\langle f, g \rangle \equiv \int_a^b f(x)g(x)w(x) dx,$$

pour plusieurs choix de (a, b) et $w: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$.

- Cas courants

Nom	(a, b)	$w(x)$
Jacobi	$(-1, 1)$	$(1-x)^\alpha(1+x)^\beta, \alpha, \beta > -1$
Legendre	$(-1, 1)$	1
Tchebyshev	$(-1, 1)$	$1/\sqrt{1-x^2}$
Laguerre	$(0, \infty)$	e^{-x}
Hermite	$(-\infty, \infty)$	e^{-x^2}

- Legendre et Tchebyshev : cas spéciaux de Jacobi.

Importance de l'orthogonalité

- Un problème de moindres carré : trouver le polynôme d'ordre n qui minimise la distance (selon le produit intérieur spécifié) à une fonction $f: (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ donnée :

$$\min_{p \in \mathcal{P}_n} \langle f - p, f - p \rangle = \min_{p \in \mathcal{P}_n} \int_a^b (f(x) - p(x))^2 w(x) dx.$$

- Si on a une famille $\{\varphi_k(x)\}_{k=0}^{\infty}$ de polynômes orthogonaux (par rapport à (a, b) et $w(\cdot)$) la solution est

$$p(x) = \sum_{k=0}^n \frac{\langle f, \varphi_k \rangle}{\langle \varphi_k, \varphi_k \rangle} \varphi_k(x).$$

Trouver des polynomes orthogonaux

- ▶ Les monômes, $1, x, x^2, \dots$ ne sont jamais orthogonaux.
- ▶ L'algorithme de Gram-Schmidt génère des polynômes orthogonaux (voir Annexe).
- ▶ Par exemple, un choix de produit intérieur donne le système de polynômes orthogonaux Tchebyshev sur $[-1, 1]$:

$$T_0 = 1, \quad T_1 = x, \quad T_2 = 2x^2 - 1, \quad T_3 = 4x^3 - 3x, \quad \dots$$

- ▶ Les polynomes d'ordre pair (impair) sont pairs (impairs).
- ▶ Les exercices et les questions d'examen sont plus faciles si on utilise les faits suivants :
 - ▶ l'intégral sur $[-a, a]$ d'une fonction impaire est zéro.
 - ▶ Le produit d'une fonction paire et une fonction impaire est impair.

Notes sur les polynômes

- ▶ Le théorème de Weierstrass démontre la force potentielle des polynômes pour l'approximation des fonctions sur les intervalles bornés.
 - ▶ Pour $f \in C^k[a, b]$, il existe une suite de polynômes p_n , où chaque p_n est un polynôme de degré n , telle que pour $l \leq k$,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \max_{x \in [a, b]} |f^{(l)}(x) - p_n^{(l)}(x)| = 0.$$

- ▶ Trouvez $p_n(x)$ qui minimise $\max_{x \in [a, b]} |f^{(l)}(x) - p_n^{(l)}(x)|$ est difficile, mais une solution moindres carrés est souvent près du minimum.
- ▶ Trouvez $p_n(x)$ qui minimise $\langle f - p_n, f - p_n \rangle$ est facile en principe, mais
 - ▶ les produits intérieurs sont rarement faisables de façon analytique
 - ▶ les intégrales numériques sont coûteux

Approximation moindres carrés de x^3

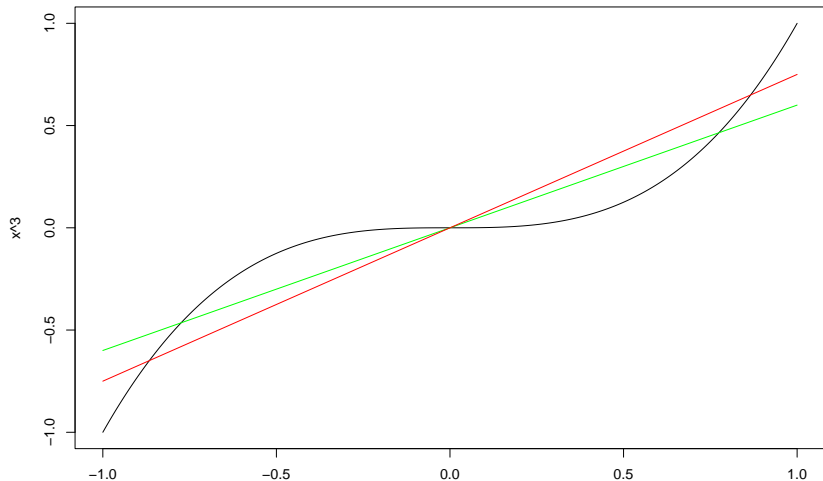
- Problème : approximer $f(x) = x^3$ sur l'intervalle $[-1, 1]$.
- Utilisons le produit intérieur avec $(a, b) = (-1, 1)$ et $w(x) = 1$.
- Problème moindres carrés : minimiser $\|f - p_2\|^2 = \langle f - p_2, f - p_2 \rangle$ pour un polynôme p_2 d'ordre 2 ou moins.
- La solution est

$$\begin{aligned}\hat{f}(x) &= \frac{\langle f, P_0 \rangle}{\langle P_0, P_0 \rangle} P_0(x) + \frac{\langle f, P_1 \rangle}{\langle P_1, P_1 \rangle} P_1(x) + \frac{\langle f, P_2 \rangle}{\langle P_2, P_2 \rangle} P_2(x) \\ &= \frac{2/5}{2/3} P_1(x) = \frac{3}{5} x.\end{aligned}$$

- Le polynôme d'ordre 2 ou moins qui minimise $\max_{x \in (-1, 1)} |f(x) - p_2(x)|$ est $\frac{3}{4} x$.

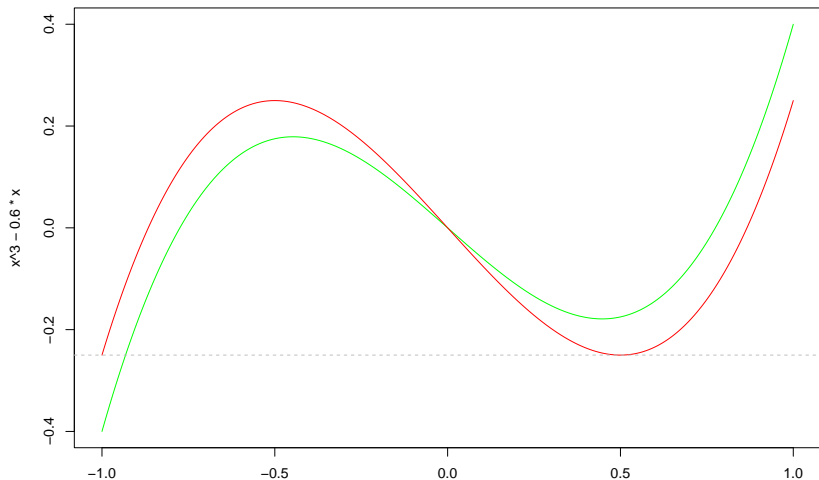
Meilleures approximations de x^3

```
x = seq(-1, 1, by=0.001)
plot(x, x^3, type='l')           # Fonction à approximer
lines(x, 0.6*x, col='green')    # Meilleur approx. MC
lines(x, 0.75*x, col='red')     # Meilleur approx. uniforme
```



Meilleures approximations de x^3 (suite)

```
x = seq(-1, 1, by=0.001)
plot(x, x^3 - 0.6*x, type='l', col='green') # Meilleur approx.
lines(x, x^3 - 0.75*x, col='red') # Meilleur approx. unif.
abline(h=-0.25, lty='dashed', col='grey')
```



Annexe : l'orthogonalisation de polynômes

- Pour un ensemble de vecteurs d'un espace pré-hilbertien (inner product space), l'algorithme de Gram-Schmidt crée un ensemble de vecteurs orthogonaux engendrant le même espace.
- L'application de l'algorithme à l'ensemble des monômes donne les formules de récursion relativement simples.
- Par exemple, les polynômes de Tchebyshev $((a, b) = (-1, 1), w(x) = (1 - x^2)^{-1/2})$ sont définie par $T_0 = 1$, $T_1 = x$, $T_{n+1}(x) = 2xT_n(x) - T_{n-1}(x)$, alors

$$T_2(x) = 2xT_1(x) - T_0(x) = 2x^2 - 1,$$

$$T_3(x) = 2xT_2(x) - T_1(x) = 4x^3 - 2x - x = 4x^3 - 3x.$$

- Pour n pair (impair), $T_n(x)$ est une fonction pair (impair).
- La solution, en forme réduite, est $T_n(x) = \cos(n \cos^{-1} x)$.
- Pour évaluer une expansion $\sum_{k=1}^n a_k T_k(x)$ à un point, on peut évaluer dans un premier temps, les $T_k(x)$ avec la récursion.