

Devoir maison n°4 : Méthode de Newton

Jules Charlier, Thomas Diot, Pierre Gallois, Jim Garnier
TE1

Partie A - Description de la méthode de Newton

1) D'une part on sait que la fonction f est dérivable donc continue sur $[a, b]$ et qu'elle y est strictement monotone car f' strictement négative. D'autre part, on dispose de $f(a) > 0$ et de $f(b) < 0$.

Ainsi, d'après le corollaire du Théorème des Valeurs Intermédiaires, il existe un unique $\alpha \in [a, b]$ tel que $f(\alpha) = 0$.

2) a) Soit $u \in [a, b]$. On note τ_u la tangente à la courbe représentative de f au point d'abscisse u .

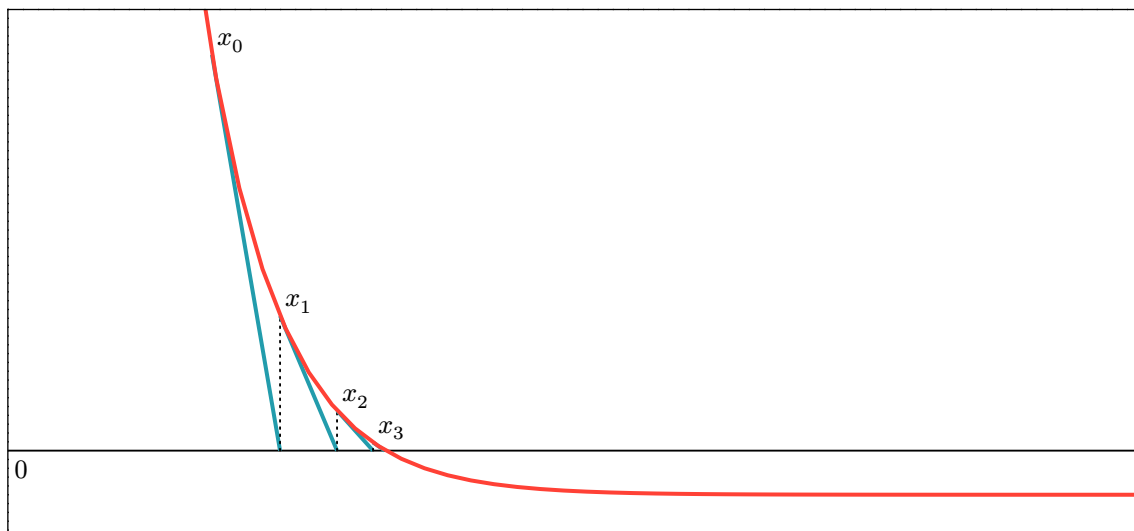
Ainsi, l'équation de τ_u est donnée par : $y = f'(u)(x - u) + f(u)$

Or $y = 0 \Leftrightarrow x = u - \frac{f(u)}{f'(u)}$.

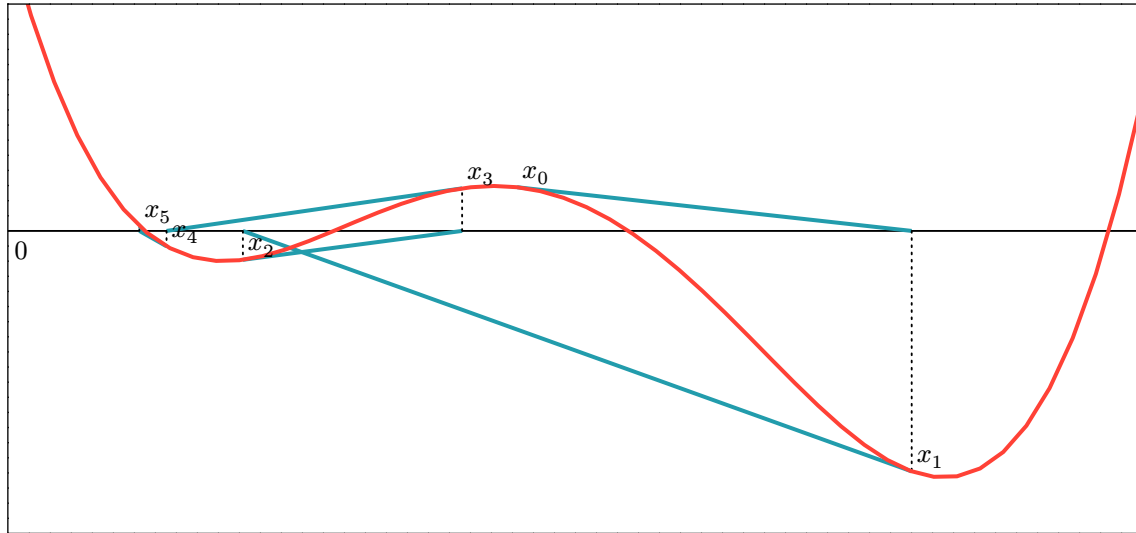
Par conséquent, τ_u coupe donc l'axe des abscisses au point d'abscisse $u - \frac{f(u)}{f'(u)}$.

b) Considérons maintenant la fonction g définie sur $[a, b]$ par $g : x \mapsto x - \frac{f(x)}{f'(x)}$ et la suite $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ par $x_0 = a$ et $x_{n+1} = g(x_n)$.

Cette suite se construit donc de la manière suivante : on part du point d'abscisse x_n sur la courbe représentative de f , on trace la tangente à cette courbe en ce point, puis on reporte l'intersection de cette tangente avec l'axe des abscisses pour obtenir le point d'abscisse x_{n+1} .¹



¹Schémas générés automatiquement pour n'importe quelle fonction. (programme dans le code source du DM, cf Github).



(Exemple de fonction ne satisfaisant pas l'énoncé, pour lequel la suite (x_n) a un comportement erratique jusqu'à atteindre un intervalle sur lequel l'énoncé est satisfait, où elle converge bien vers une racine).

3) a) La fonction g est dérivable sur $[a, b]$ par composition de fonctions dérivables, dont f' qui ne s'y annule pas, et pour tout $x \in [a, b]$, on a : $g'(x) = \frac{f(x)f''(x)}{(f'(x))^2}$

Ainsi, g' de même signe que f sur $[a, b]$ et donc g est strictement croissante sur $[a, \alpha]$ et strictement décroissante sur $[\alpha, b]$.

b) Montrons que pour tout $n \in \mathbb{N}$, $a \leq x_n \leq \alpha$ en procédant par récurrence :

- Initialisation : $x_0 = a$ donc $a \leq x_0 \leq \alpha$.
- Hérédité : Soit $n \in \mathbb{N}$, supposons que $a \leq x_n \leq \alpha$. Comme $\alpha \leq b$, $x_n \in [a, b]$ et $g(x_n)$ est bien défini. Par croissance de g sur $[a, \alpha]$, on a $g(a) \leq g(x_n) \leq g(\alpha) = \alpha$. Or $a \leq g(a)$, donc $a \leq x_{n+1} \leq \alpha$.

Par conséquent, on en déduit que pour tout $n \in \mathbb{N}$, $a \leq x_n \leq \alpha$.

4) a) Montrons que (x_n) est croissante. Pour tout $n \in \mathbb{N}$:

$$x_{n+1} - x_n = g(x_n) - x_n = -\frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

Comme $x_n \in [a, \alpha]$, $f(x_n) \geq 0$. De plus, f' est strictement négative sur $[a, b]$. Ainsi, on a $x_{n+1} - x_n \geq 0$ et (x_n) est bien croissante.

b) La suite (x_n) est croissante et bornée par α : par le théorème de la limite monotone, la suite (x_n) tend vers une limite $\ell \in [a, \alpha]$; $g(\ell)$ est donc bien définie. De plus, par continuité de g et unicité de la limite :

$$g(\ell) = g\left(\lim_{n \rightarrow \infty} x_n\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} g(x_n) = \lim_{n \rightarrow +\infty} x_{n+1} = \ell$$

Donc ℓ est un point fixe de g : le seul point fixe de g sur $[a, \alpha]$ étant α , on déduit que $(x_n) \rightarrow \alpha$.



Partie B - Vitesse de convergence

1) $\varphi : x \mapsto f(b) - f(x) - (b-x)f'(x) - \frac{(b-x)^2}{(b-a)^2}(f(b) - f(a) - (b-a)f'(a))$, définie sur $[a; b]$, est dérivable sur $[a; b]$ par opérations. Sa dérivée est pour tout $x \in [a; b]$:

$$\varphi'(x) = (b-x) \left(\frac{2((b-a)f'(a) - f(a) + f(b))}{(b-a)^2} - f''(x) \right)$$

De plus, on vérifie que $\varphi(a) = \varphi(b) = 0$. Le théorème de Rolle donne l'existence de $c \in]a; b[$ tel que $\varphi'(c) = 0$, c'est à dire :

$$\begin{aligned} f''(c) &= \frac{2(f(b) - f(a) - (b-a)f'(a))}{(b-a)^2} \\ \Leftrightarrow f(b) - f(a) &= (b-a)f'(a) + \frac{(b-a)^2}{2} f''(c) \end{aligned}$$

Ce qu'il fallait démontrer.

2) f' est dérivable donc continue sur $[a; b]$. Le théorème des bornes atteintes donne donc un $m \in \mathbb{R}$ tel que $f' \leq m$. De plus, f' atteint m : comme $f' < 0$, $m < 0$ et pour tout $x \in [a; b]$, $|f'(x)| \geq |m| > 0$.

De même, f'' est continue sur $[a; b]$, donc bornée sur $[a; b]$: il existe donc $M \geq 0$ tel que $|f''(x)| \leq M$. Comme $f'' > 0$, $M > 0$ et on a ce que l'on voulait démontrer.

3) La formule de Taylor-Lagrange appliquée à f sur $[x; \alpha]$ donne $c \in]x; \alpha[$ tel que :

$$f(\alpha) - f(x) - (\alpha - x)f'(x) = \frac{(\alpha - x)^2}{2} f''(c)$$

En passant à la valeur absolue et en utilisant $f'' \leq M$, on obtient :

$$\begin{aligned} |f(\alpha) - f(x) - (\alpha - x)f'(x)| &\leq \frac{(\alpha - x)^2}{2} M \\ \Leftrightarrow \left| x - \frac{f(x)}{f'(x)} - \left(f(\alpha) - \frac{f(\alpha)}{f'(\alpha)} \right) \right| &\leq \frac{(\alpha - x)^2 M}{2f'(x)} \end{aligned}$$

En remarquant que $f(\alpha) = 0$, on a $\frac{f(\alpha)}{f'(\alpha)} = \frac{f(\alpha)}{f'(\alpha)}$. En utilisant cette réécriture et le fait que $f' \geq m$, on a enfin :

$$|g(x) - \alpha| = |g(x) - g(\alpha)| \leq \frac{(\alpha - x)^2 M}{2m}$$

4) Posons pour tout $n \in \mathbb{N}$, $u_n = \frac{M}{2m} |x_n - \alpha|$. D'après le 4)b) de la partie A, on sait que $(x_n) \rightarrow \alpha$. Donc $(u_n) \rightarrow 0$ par continuité de $|\cdot|$ et produit, et il existe donc par définition un $N \in \mathbb{N}$ tel que $u_n = \frac{M}{2m} |x_n - \alpha| < 1$.



5) D'après le 3), $u_{n+1} \leq u_n^2$. Montrons d'abord par récurrence que pour tout $n \geq N$, $u_n \leq u_N^{2^{n-N}}$.

Initialisation : $u_N \leq u_N^1$.

Hérédité : Si pour $n \geq N$, $u_n \leq u_N^{2^{n-N}}$, alors :

$$u_{n+1} \leq u_n^2 \leq u_N^{2 \cdot 2^{n-N}} = u_N^{2^{(n+1)-N}}$$

Ce qui conclut la récurrence.

Ainsi, pour tout $n \geq N$:

$$\begin{aligned} u_n \leq u_N^{2^{n-N}} &\Leftrightarrow \frac{M}{2m} |x_n - \alpha| \leq (u_N^{2^{n-N}})^{2^n} \\ &\Leftrightarrow |x_n - \alpha| \leq \frac{2m}{M} (u_N^{2^{n-N}})^{2^n} \end{aligned}$$

On obtient le résultat voulu avec $C = \frac{2m}{M} > 0$ et $k = u_N^{2^{n-N}}$, où $k < 1$ car $u_N < 1$ et $x^a < 1$ pour tout $a \in \mathbb{R}_*^+$ quand $x < 1$.

Partie C - Algorithmes

1) Pour $f(x) = x^2 - a$, $f'(x) = 2x$ et on a donc pour tout $n \in \mathbb{N}$:

$$u_{n+1} = u_n - \frac{u_n^2 - a}{2u_n} = \frac{u_n^2 + a}{2u_n}$$

Qui tend pour tout $a \in \mathbb{R}_*^+$ vers \sqrt{a} , car f satisfait les conditions de l'énoncé sur $[0; X]$ pour tout $X > \sqrt{a}$: pour $a > 1$, on peut prendre $X = a$ sans avoir à calculer \sqrt{a} .

2) Pour $f(x) = x^3 - 2$, $f'(x) = 3x$ et pour tout $n \in \mathbb{N}$:

$$u_{n+1} = u_n - \frac{u_n^3 - 2}{3u_n} = \frac{3u_n^2 - u_n^3 + 2}{3u_n}$$

Qui tend vers $\sqrt[3]{2}$ car f satisfait les conditions de l'énoncé sur $[0; 3]$, car $3 > \sqrt[3]{2}$ et f est strictement croissante.

3) Ce script calcule (dans la boucle) les termes de la suite (x_n) jusqu'à avoir atteint une précision suffisante ε en image, et renvoie le dernier terme calculé comme valeur de α .

Tentons maintenant de simplifier et d'optimiser ce code :

```
f = lambda x: x**3 - 2

def newton(f, x, h=1e-4, epsilon=1e-6):
```



```
while abs(y := f(x)) > epsilon:  
    derivee = (f(x + h) - f(x - h)) / (2 * h)  
    x -= (y / derivee)  
return x
```

Pour aller encore plus loin dans la simplification, changeons de langage pour Haskell :

```
f :: (Num r) => r -> r  
f x = x^3 - 2  
  
derivee f x h = (f (x + h) - f (x - h)) / (2*h)  
  
newton f h e x =  
    if (abs . f) x > e  
    then newton f h e (x - (f(x) / (derivee f x h)))  
    else x  
  
main :: IO ()  
main = do  
    let initialGuess = 1.0 -- Initial guess for the root  
        h = 1e-4 -- Small step for derivative approximation  
        e = 1e-6 -- Tolerance level for convergence  
        root = newton f h e initialGuess  
    putStrLn $ "Root found: " ++ show root
```