

Analyse Numérique I

Sup'Galilée, Ingénieurs MACS, 1ère année / L3 MIM

François Cuvelier

Laboratoire d'Analyse Géométrie et Applications
Institut Galilée
Université Paris XIII.

2023/10/02

Plan du cours

- Chapitre 1: Erreurs : arrondis, bug and Co.
- Chapitre 2: Langage algorithmique
- Chapitre 3: Rappels algèbre linéaire
- Chapitre 4: Résolution de systèmes non-linéaires**
- Chapitre 5: Résolution de systèmes linéaires
- Chapitre 6: Polynômes d'interpolation
- Chapitre 7: Intégration numérique

Racines/zéros d'un polynôme

- **degré 2** : Babyloniens en 1600 avant J.-C.
- **degré 3** : *Scipio del Ferro* (1465-1526, mathématicien italien) et *Niccolo Fontana* (1499-1557, mathématicien italien)
- **degré 4** : *Ludovico Ferrari* (1522-1565, mathématicien italien)
- **degré 5** : *Paolo Ruffini* (1765-1822, mathématicien italien) en 1799, *Niels Henrick Abel* (1802-1829, mathématicien norvégien) en 1824, montrent qu'il n'existe **pas de solution analytique**.



(a) *Niccolo Fontana* 1499-1557, mathématicien italien



(b) *Paolo Ruffini* 1765-1822, mathématicien italien



(c) *Niels Henrick Abel* 1802-1829, mathématicien norvégien

Plan

- 1 Recherche des zéros d'une fonction
 - Méthode de dichotomie ou de bisection
 - Points fixes d'une fonction (dimension 1)
 - Points fixes attractifs et répulsifs
 - Algorithme générique du point fixe
 - Points fixes pour la recherche de racines
- 2 Résolution de systèmes non linéaires
 - Méthode de la corde
 - La méthode de Newton
 - Méthode de la sécante
 - Point fixe
 - Méthode de Newton
 - Exemples

Soit $f : \mathcal{D} \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction continue.

$$\alpha \in \mathcal{D} \text{ tels que } f(\alpha) = 0.$$

Soit $I =]a, b[$, $\bar{I} \subset \mathcal{D}$ on suppose $\exists ! \alpha \in I$ tel que $f(\alpha) = 0$.

Plan

- 1 Recherche des zéros d'une fonction
 - Méthode de dichotomie ou de bisection
 - Points fixes d'une fonction (dimension 1)
 - Points fixes attractifs et répulsifs
 - Algorithme générique du point fixe
 - Points fixes pour la recherche de racines
- 2 Résolution de systèmes non linéaires
 - Méthode de la corde
 - La méthode de Newton
 - Méthode de la sécante
 - Point fixe
 - Méthode de Newton
 - Exemples

principe de la méthode de dichotomie : Soit I un intervalle contenant un **unique zéro** de la fonction f , on le divise par son milieu en deux intervalles et on détermine lequel des deux contient le zéro. On itère ce processus sur le nouvel intervalle.

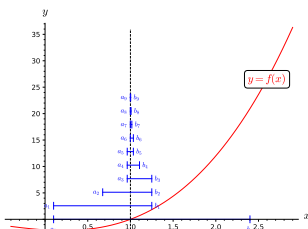


Figure: Méthode de dichotomie: $f(x) = (x + 2)(x + 1)(x - 1)$

principe de la méthode de dichotomie : Soit I un intervalle contenant un **unique zéro** de la fonction f , on le divise par son milieu en deux intervalles et on détermine lequel des deux contient le zéro. On itère ce processus sur le nouvel intervalle.

- $a_0 = a$, $b_0 = b$ et $x_0 = \frac{a+b}{2}$,
- $\forall k \in \mathbb{N}$

$$\begin{cases} a_{k+1} = b_{k+1} = x_k & \text{si } f(x_k) = 0, \\ a_{k+1} = x_k, b_{k+1} = b_k & \text{si } f(b_k)f(x_k) < 0, \\ a_{k+1} = a_k, b_{k+1} = x_k & \text{sinon (i.e. } f(a_k)f(x_k) < 0.) \end{cases}$$

et

$$x_{k+1} = (a_{k+1} + b_{k+1})/2.$$



Exercice 1

On suppose que la fonction f est continue sur $[a, b]$, vérifie $f(a)f(b) < 0$ et qu'il existe un unique $\alpha \in]a, b[$ tel que $f(\alpha) = 0$.

Q.1

- ➊ Montrer que les suites (a_k) et (b_k) convergent vers α .
- ➋ En déduire que la suite (x_k) converge vers α .

Q.2

- ➊ Montrer que pour tout $k \in \mathbb{N}$, $|x_k - \alpha| \leq \frac{b-a}{2^{k+1}}$.
- ➋ Soit $\epsilon > 0$. En déduire que si $k \geq \frac{\log(\frac{b-a}{\epsilon})}{\log(2)} - 1$ alors $|x_k - \alpha| \leq \epsilon$.



Proposition 1.1

Soit $f : [a, b] \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction continue vérifiant $f(a)f(b) < 0$ et admettant $\alpha \in]a, b[$ comme **unique** solution de $f(x) = 0$. Alors la suite $(x_k)_{k \in \mathbb{N}}$ définie par la méthode de dichotomie converge vers α et

$$|x_k - \alpha| \leq \frac{b-a}{2^{k+1}}, \quad \forall k \in \mathbb{N}.$$

On a alors $\forall \epsilon > 0, \forall k \geq \frac{\log(\frac{b-a}{\epsilon})}{\log(2)} - 1$

$$|x_k - \alpha| \leq \epsilon.$$



Algorithme

- Que cherche-t'on?
- Quelles sont les données du problèmes?

Algorithme

- Que cherche-t'on?
- **Résultat** :
 α_ϵ : un réel tel que $|\alpha_\epsilon - \alpha| \leq \epsilon$.
- Quelles sont les données du problèmes?

Algorithme

- Que cherche-t'on?

Résultat :
 α_ϵ : un réel tel que $|\alpha_\epsilon - \alpha| \leq \epsilon$.

- Quelles sont les données du problèmes?

Données : a, b : deux réels $a < b$,
 f : $[a, b] \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ vérifiant les hypothèses de la proposition ,
 ϵ : un réel strictement positif.

Algorithme 1 \mathcal{R}_0

- 1: $k_{\min} \leftarrow E(\frac{\log(\frac{b-a}{\epsilon})}{\log(2)}) \triangleright E$, partie entière
- 2: Calcul de la suite $(x_k)_{k=0}^{k_{\min}}$ par dichotomie
- 3: $\alpha_\epsilon \leftarrow X_{k_{\min}}$

Algorithme 1 \mathcal{R}_1

- 1: $k_{\min} \leftarrow E(\frac{\log(\frac{b-a}{\epsilon})}{\log(2)}) \triangleright E$, partie entière
- 2: Initialisation de x_0
- 3: **Pour** $k \leftarrow 0$ à $k_{\min} - 1$ **faire**
- 4: Calcul de la suite (x_{k+1}) par dichotomie
- 5: **Fin Pour**
- 6: $\alpha_\epsilon \leftarrow X_{k_{\min}}$

Algorithme 1 \mathcal{R}_1

- 1: $k_{\min} \leftarrow E(\frac{\log(\frac{b-a}{\epsilon})}{\log(2)}) \triangleright E$, partie entière
- 2: Initialisation de x_0
- 3: **Pour** $k \leftarrow 0$ à $k_{\min} - 1$ **faire**
- 4: Calcul de la suite (x_{k+1}) par dichotomie
- 5: **Fin Pour**
- 6: $\alpha_\epsilon \leftarrow X_{k_{\min}}$

Algorithme 1 \mathcal{R}_2

- 1: $k_{\min} \leftarrow E(\frac{\log(\frac{b-a}{\epsilon})}{\log(2)})$
- 2: $a_0 \leftarrow a, b_0 \leftarrow b$
- 3: $x_0 \leftarrow \frac{a_0 + b_0}{2}$
- 4: **Pour** $k \leftarrow 0$ à $k_{\min} - 1$ **faire**
- 5: **Si** $f(x_k) == 0$ **alors**
- 6: $a_{k+1} \leftarrow x_k, b_{k+1} \leftarrow x_k$
- 7: **Si non Si** $f(x_k)f(b_k) < 0$ **alors**
- 8: $a_{k+1} \leftarrow x_k, b_{k+1} \leftarrow b_k$
- 9: **Si non**
- 10: $a_{k+1} \leftarrow a_k, b_{k+1} \leftarrow x_k$
- 11: **Fin Si**
- 12: $x_{k+1} \leftarrow \frac{a_{k+1} + b_{k+1}}{2}$
- 13: **Fin Pour**
- 14: $\alpha_\epsilon \leftarrow X_{k_{\min}}$

Algorithm Méthode de dichotomie : version 1

Données : a, b : deux réels $a < b$,
 f : $f : [a, b] \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ vérifiant les hypothèses de la proposition 1.1,
 ϵ : un réel strictement positif.
Résultat : x : un réel tel que $|x - \alpha| \leq \epsilon$.

- 1: **Fonction** $x \leftarrow$ **DICHOTOMIE1** (f, a, b, ϵ)
- 2: $k_{\min} \leftarrow E(\log((b-a)/\epsilon)/\log(2))$
- 3: $A, B, X \in \mathbb{R}^{k_{\min}+1} \triangleright A(k+1)$ contiendra a_k, \dots
- 4: $A(1) \leftarrow a, B(1) \leftarrow b, X(1) \leftarrow (a+b)/2$
- 5: **Pour** $k \leftarrow 1$ à k_{\min} **faire**
- 6: **Si** $f(X(k)) == 0$ **alors**
- 7: $A(k+1) \leftarrow X(k), B(k+1) \leftarrow X(k)$
- 8: **Si non Si** $f(B(k))f(X(k)) < 0$ **alors**
- 9: $A(k+1) \leftarrow X(k), B(k+1) \leftarrow B(k)$
- 10: **Si non**
- 11: $A(k+1) \leftarrow A(k), B(k+1) \leftarrow X(k)$
- 12: **Fin Si**
- 13: $X(k+1) \leftarrow (A(k+1) + B(k+1))/2$
- 14: **Fin Pour**
- 15: $x \leftarrow X(k_{\min} + 1)$
- 16: **Fin Fonction**

Algorithme : versions 2, 3 et + si affinités

- $A = a, B = b$ et $x_0 = \frac{A+B}{2}$,
- $\forall k \in \llbracket 0, k_{\min} - 1 \rrbracket$,

$$\begin{cases} A = B = x_k & \text{si } f(x_k) = 0, \\ A = x_k, B \text{ inchangé} & \text{si } f(B)f(x_k) < 0, \\ B = x_k, A \text{ inchangé} & \text{sinon (i.e. } f(A)f(x_k) < 0.) \end{cases}$$

et

$$x_{k+1} = \frac{A + B}{2}$$

Algorithm Méthode de dichotomie : version 2

Données : a, b : deux réels $a < b$,
 f : $f : [a, b] \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ vérifiant les hypothèses de la proposition 1.1,
 eps : un réel strictement positif.
Résultat : x : un réel tel que $|x - \alpha| \leq \text{eps}$.

```

1: Fonction  $x \leftarrow \text{DICHOTOMIE2}(f, a, b, \text{eps})$ 
2:  $k_{\min} \leftarrow \lceil \log((b-a)/\text{eps}) / \log(2) \rceil$ 
3:  $X \in \mathbb{R}^{k_{\min}+1} \triangleright X(k+1)$  contiendra  $x_k, \dots$ 
4:  $A \leftarrow a, B \leftarrow b, X(1) \leftarrow (A+B)/2$ 
5: Pour  $k \leftarrow 1$  à  $k_{\min}$  faire
6:   Si  $f(X(k)) == 0$  alors
7:      $A \leftarrow X(k), B \leftarrow X(k)$ 
8:   Sinon Si  $f(B)f(X(k)) < 0$  alors
9:      $A \leftarrow X(k) \triangleright B$  inchangé
10:  Sinon
11:     $B \leftarrow X(k) \triangleright A$  inchangé
12:  Fin Si
13:   $X(k+1) \leftarrow (A+B)/2$ 
14: Fin Pour
15:  $x \leftarrow X(k_{\min} + 1)$ 
16: Fin Fonction
    
```

Algorithm Méthode de dichotomie : version 3

Données : a, b : deux réels $a < b$,
 f : $f : [a, b] \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ vérifiant les hypothèses de la proposition 1.1,
 eps : un réel strictement positif.
Résultat : x : un réel tel que $|x - \alpha| \leq \text{eps}$.

```

1: Fonction  $x \leftarrow \text{DICHOTOMIE3}(f, a, b, \text{eps})$ 
2:  $k_{\min} \leftarrow \lceil \log((b-a)/\text{eps}) / \log(2) \rceil$ 
3:  $A, B \in \mathbb{R}$ 
4:  $A \leftarrow a, B \leftarrow b, x \leftarrow (a+b)/2$ 
5: Pour  $k \leftarrow 1$  à  $k_{\min}$  faire
6:   Si  $f(x) == 0$  alors
7:      $A \leftarrow x, B \leftarrow x$ 
8:   Sinon Si  $f(B)f(x) < 0$  alors
9:      $A \leftarrow x \triangleright B$  inchangé
10:  Sinon
11:     $B \leftarrow x \triangleright A$  inchangé
12:  Fin Si
13:   $x \leftarrow (A+B)/2$ 
14: Fin Pour
15: Fin Fonction
    
```

Algorithm Méthode de dichotomie : version 4

Données : a, b : deux réels $a < b$,
 f : $f \in \mathcal{C}^0([a, b]; \mathbb{R})$ et $f(a)f(b) < 0$
 eps : un réel strictement positif.
Résultat : x : un réel tel que $|x - \alpha| \leq \text{eps}$.

```

1: Fonction  $x \leftarrow \text{DICHOTOMIE4}(f, a, b, \text{eps})$ 
2:  $A, B \in \mathbb{R}$ 
3:  $A \leftarrow a, B \leftarrow b, x \leftarrow (a+b)/2$ 
4: Tantque  $|x - A| > \text{eps}$  faire
5:   Si  $f(x) == 0$  alors
6:      $A \leftarrow x, B \leftarrow x$ 
7:   Sinon Si  $f(B)f(x) < 0$  alors
8:      $A \leftarrow x \triangleright B$  inchangé
9:   Sinon
10:     $B \leftarrow x \triangleright A$  inchangé
11:   Fin Si
12:    $x \leftarrow (A+B)/2$ 
13: Fin Tantque
14: Fin Fonction
    
```

Que pensez vous de cet algorithme?

Algorithme Méthode de dichotomie : version 5

Données : a, b : deux réels $a < b$,
 f : $f \in \mathcal{C}^0([a, b]; \mathbb{R})$ et $f(a)f(b) < 0$.

Résultat : x : un réel tel que $f(x) = 0$.

```
1: Fonction  $x \leftarrow \text{DICHOTOMIE5}(f, a, b)$ 
2:  $A, B \in \mathbb{R}$ 
3:  $A \leftarrow a, B \leftarrow b, x \leftarrow (a + b)/2, xp \leftarrow a$ 
4: Tantque  $x \sim xp$  faire
5:   Si  $f(B)f(x) < 0$  alors
6:      $A \leftarrow x$                                  $\triangleright B$  inchangé
7:   Sinon
8:      $B \leftarrow x$                                  $\triangleright A$  inchangé
9:   Fin Si
10:   $xp \leftarrow x$ 
11:   $x \leftarrow (A + B)/2$ 
12: Fin Tantque
13: Fin Fonction
```

Plan

1 Recherche des zéros d'une fonction

- Méthode de dichotomie ou de bisection
- Points fixes d'une fonction (dimension 1)
- Points fixes attractifs et répulsifs
- Algorithme générique du point fixe
- Points fixes pour la recherche de racines

2 Résolution de systèmes non linéaires

- Méthode de la corde
- La méthode de Newton
- Méthode de la sécante
- Point fixe
- Méthode de Newton
- Exemples

Points fixes

Soit $\Phi : [a, b] \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction donnée. Rechercher un **point fixe** de Φ revient à

Trouver $\alpha \in [a, b]$ tel que

$$\alpha = \Phi(\alpha).$$

L'algorithme de la **méthode du point fixe** consiste en la construction, si elle existe, de la suite

$$x^{(k+1)} = \Phi(x^{(k)}), \quad \forall k \in \mathbb{N} \quad (1)$$

avec $x^{(0)} \in [a, b]$ donné.

♥ Definition 1.2

Soient (E, d) un **espace métrique** et $(u^{[k]})_{k \in \mathbb{N}}$ une suite d'éléments de E convergeant vers $\alpha \in E$. On dit que cette suite **converge vers α avec un ordre $p \geq 1$ au moins** si

$$\exists k_0 \in \mathbb{N}, \exists C > 0 \text{ tels que } d(u^{[k+1]}, \alpha) \leq C d(u^{[k]}, \alpha)^p, \quad \forall k \geq k_0. \quad (2)$$

où $C < 1$ si $p = 1$.

Exemples de distances:

- $d(x, y) = |x - y|$ dans $\mathbb{R}, \mathbb{C}, \mathbb{Z}$ ou \mathbb{Q}
- $d(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|$ dans \mathbb{R}^n , où $\|\cdot\|$ est l'une quelconque des normes habituelles.

Théorème 2: Théorème du point fixe dans \mathbb{R}

Soient $[a, b]$ un intervalle non vide de \mathbb{R} et Φ une application continue de $[a, b]$ dans lui-même. Alors, il existe **au moins** un point $\alpha \in [a, b]$ vérifiant $\Phi(\alpha) = \alpha$. Le point α est appelé **point fixe de la fonction** Φ .
De plus, si Φ est contractante (lipschitzienne de rapport $L \in [0, 1[$), c'est à dire

$$\exists L < 1 \text{ t.q. } |\Phi(x) - \Phi(y)| \leq L|x - y| \quad \forall (x, y) \in [a, b]^2, \quad (3)$$

alors Φ admet un **unique** point fixe $\alpha \in [a, b]$.
Pour tout $x_0 \in [a, b]$, la suite

$$x_{k+1} = \Phi(x_k), \quad \forall k \in \mathbb{N} \quad (4)$$

est bien définie et elle converge vers α avec un ordre 1 au moins.
On a les deux estimations suivantes :

$$|x_k - \alpha| \leq L^k |x_0 - \alpha|, \quad \forall k \geq 0, \quad (5)$$

$$|x_k - \alpha| \leq \frac{L}{1-L} |x_k - x_{k-1}|, \quad \forall k \geq 0, \quad (6)$$

Théorème 3: Convergence globale, méthode du point fixe

Soit $\Phi \in C^1([a, b])$ vérifiant $\Phi([a, b]) \subset [a, b]$ et

$$\exists L < 1 \text{ tel que } \forall x \in [a, b], |\Phi'(x)| \leq L, \quad (7)$$

Soit $x_0 \in [a, b]$ et $(x_k)_{k \in \mathbb{N}}$ la suite définie par $x_{k+1} = \Phi(x_k)$. On a alors

- 1 la fonction Φ admet un unique point fixe $\alpha \in [a, b]$,
- 2 $\forall k \in \mathbb{N}, x_k \in [a, b]$,
- 3 la suite (x_k) converge vers α avec un ordre 1 au moins.
- 4 Si $x_0 \neq \alpha$, alors

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} \frac{x_{k+1} - \alpha}{x_k - \alpha} = \Phi'(\alpha). \quad (8)$$

Théorème 4: Convergence locale du point fixe

Soit α un point fixe d'une fonction Φ de classe C^1 au voisinage de α .
Si $|\Phi'(\alpha)| < 1$, alors il existe $\delta > 0$ pour lequel x_k converge vers α pour tout x_0 tel que $|x_0 - \alpha| \leq \delta$.
De plus, si $x_0 \neq \alpha$, on a

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} \frac{x_{k+1} - \alpha}{x_k - \alpha} = \Phi'(\alpha). \quad (9)$$

Exercice 2:

Soit α un point fixe d'une fonction Φ de classe C^1 au voisinage de α et vérifiant $\Phi'(\alpha) = 0$.

Q.1 Montrer qu'il existe $\delta > 0$ tel que $\forall x_0 \in]\alpha - \delta, \alpha + \delta[$ la suite définie par $x_{k+1} = \Phi(x_k)$ converge vers α .

On suppose de plus que Φ' est dérivable sur $]\alpha - \delta, \alpha + \delta[$ et qu'il existe $M \in \mathbb{R}^+$ tel que

$$\forall x \in]\alpha - \delta, \alpha + \delta[, |\Phi''(x)| \leq M$$

Q.2

- 1 Montrer que

$$\forall x_0 \in]\alpha - \delta, \alpha + \delta[, |x_k - \alpha| \leq \frac{2}{M} \left(\frac{1}{2} M |x_0 - \alpha| \right)^{2^k}$$

- 2 Quel est l'ordre de convergence dans ce cas.

Q.3 A quelle condition a-t-on

$$|x_k - \alpha| \leq \frac{2}{M} 10^{-2^k}.$$



Proposition 4.1:



Soit $p \in \mathbb{N}^*$, et $\Phi \in \mathcal{C}^{p+1}(\mathcal{V})$ pour un certain voisinage \mathcal{V} de α point fixe de Φ . Si $\Phi^{(i)}(\alpha) = 0$, pour $1 \leq i \leq p$ et si $\Phi^{(p+1)}(\alpha) \neq 0$, alors la méthode de point fixe associée à la fonction Φ est d'ordre $p + 1$ et

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} \frac{x_{k+1} - \alpha}{(x_k - \alpha)^{p+1}} = \frac{\Phi^{(p+1)}(\alpha)}{(p+1)!}. \quad (10)$$

Plan

- 1 Recherche des zéros d'une fonction
 - Méthode de dichotomie ou de bisection
 - Points fixes d'une fonction (dimension 1)
 - **Points fixes attractifs et répulsifs**
 - Algorithme générique du point fixe
 - Points fixes pour la recherche de racines
- 2 Résolution de systèmes non linéaires
 - Point fixe
 - Méthode de Newton
 - Exemples

Points fixes attractifs et répulsifs

Soit $\Phi : [a, b] \rightarrow [a, b]$ une application de classe \mathcal{C}^1 admettant un point fixe $\alpha \in [a, b]$.

- Si $|\Phi'(\alpha)| < 1$ alors α est un point fixe attractif,
- Si $|\Phi'(\alpha)| > 1$ alors α est un point fixe répulsif.

On s'intéresse ici au point fixe $\alpha = 1$ de la fonction $\Phi : x \mapsto x^2$.

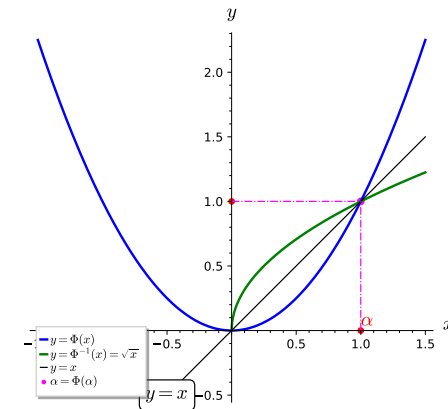


Figure: fonction x^2 et sa fonction réciproque \sqrt{x} sur $[0, +\infty[$

$\Phi'(\alpha) = 2$: **point fixe répulsif**

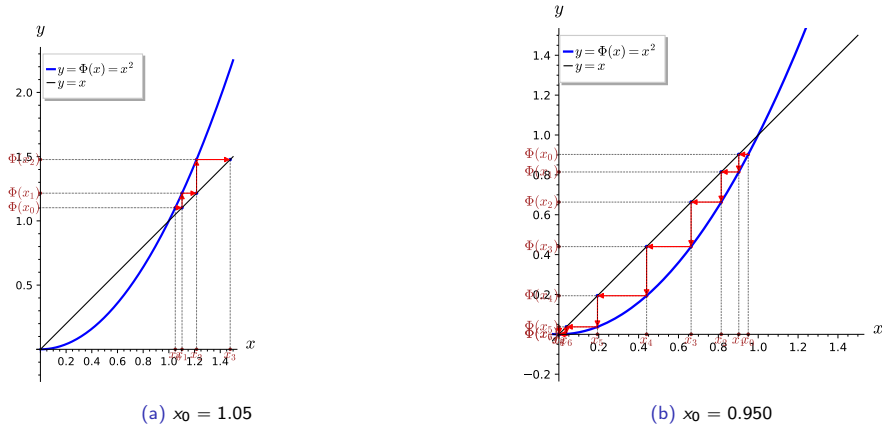


Figure: $\alpha = 1$, point fixe répulsif de $x \mapsto x^2$

$(\Phi^{-1})'(1) = 1/2 < 1$: **point fixe attractif**

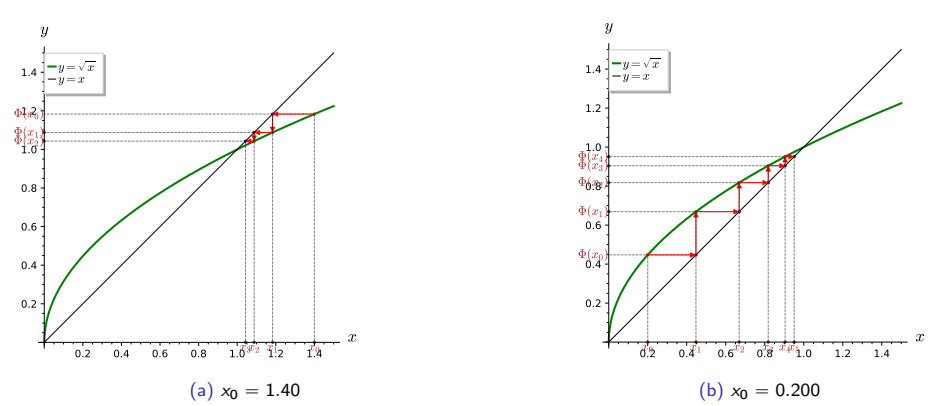


Figure: $\alpha = 1$, point fixe attractif de $\Phi^{-1} : x \mapsto \sqrt{x}$

fonction $\Phi : x \mapsto x^2 - x + 1$: **point fixe $\alpha = 1$, $\Phi'(\alpha) = 1$.**

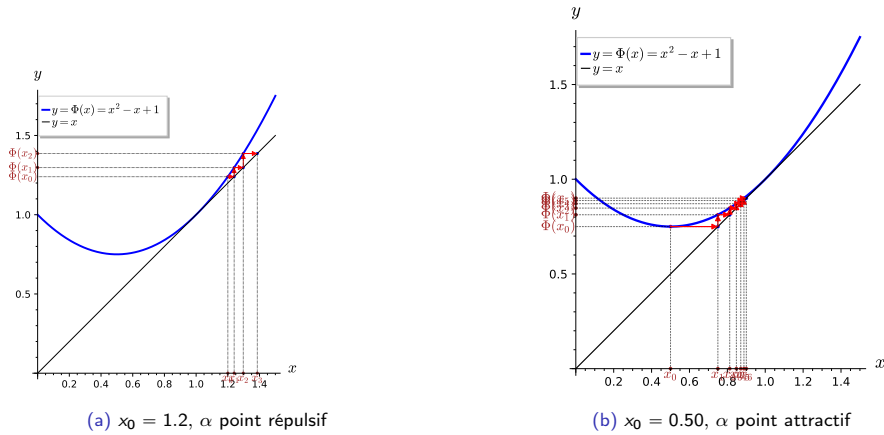


Figure: $\alpha = 1$, point fixe attractif ou répulsif de $x \mapsto x^2 - x + 1$

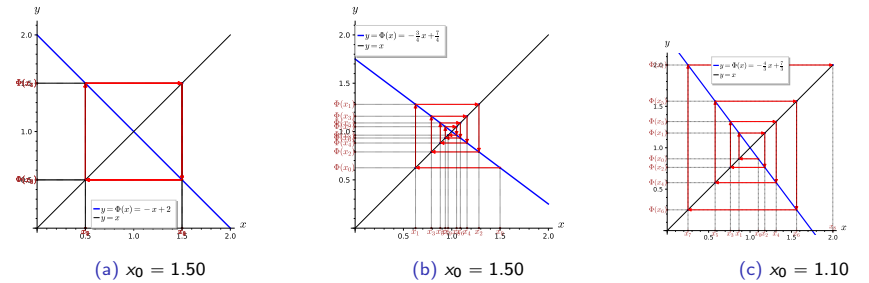


Figure: $\alpha = 1$, point fixe de fonctions affines particulières

Plan

- 1 Recherche des zéros d'une fonction
 - Méthode de dichotomie ou de bisection
 - Points fixes d'une fonction (dimension 1)
 - Points fixes attractifs et répulsifs
 - Algorithme générique du point fixe
 - Points fixes pour la recherche de racines
- 2 Résolution de systèmes non linéaires
 - Point fixe
 - Méthode de Newton
 - Exemples
- Méthode de la corde
- La méthode de Newton
- Méthode de la sécante

Recherche des zéros d'une fonction Algorithme générique du point fixe 2023/10/02 34 / 80

Algorithme générique du point fixe

$$x^{(k+1)} = \Phi(x^{(k)}), \forall k \in \mathbb{N}, \text{ avec } x^{(0)} \in [a, b] \text{ donné.}$$

Algorithm Méthode de point fixe : version **Tantque** *formel*

- $k \leftarrow 0$
- Tantque** non convergence **faire**
- $x_{k+1} \leftarrow \Phi(x_k)$
- $k \leftarrow k + 1$
- Fin Tantque**
- $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow x_k$ ▷ le dernier calculé.

Algorithm Méthode de point fixe : version **Répéter** *formel*

- $k \leftarrow 0$
- Répéter**
- $k \leftarrow k + 1$
- $x_k \leftarrow \Phi(x_{k-1})$
- jusqu'à** convergence
- $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow x_k$ ▷ le dernier calculé.

Critères d'arrêt?

- On n'est pas sûr de converger \implies kmax: nb maximum d'itérations,
- Si on converge, on s'arrête dès que $|\Phi(x_k) - x_k| = |x_{k+1} - x_k| \leq \text{tol}$.

Recherche des zéros d'une fonction Algorithme générique du point fixe 2023/10/02 35 / 80

Algorithme générique du point fixe

Algorithm Méthode de point fixe : version **Tantque** *formel* avec critères d'arrêt

- $k \leftarrow 0$
- $\text{err} \leftarrow |\Phi(x_0) - x_0|$ ▷ ou $\frac{|\Phi(x_0) - x_0|}{|x_0| + 1}$
- Tantque** $\text{err} > \epsilon$ et $k \leq \text{kmax}$ **faire**
- $k \leftarrow k + 1$
- $x_k \leftarrow \Phi(x_{k-1})$
- $\text{err} \leftarrow |\Phi(x_k) - x_k|$ ▷ ou $\frac{|\Phi(x_k) - x_k|}{|x_k| + 1}$
- Fin Tantque**
- Si** $\text{err} \leq \text{tol}$ **alors** ▷ Convergence
- $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow x_k$ ▷ $|\Phi(\alpha_{\text{tol}}) - \alpha_{\text{tol}}| \leq \text{tol}$
- Fin Si**

Algorithm Méthode de point fixe : version **Répéter** *formel* avec critères d'arrêt

- $k \leftarrow 0$
- Répéter**
- $\text{err} \leftarrow |\Phi(x_k) - x_k|$ ▷ ou $\frac{|\Phi(x_k) - x_k|}{|x_k| + 1}$
- $x_{k+1} \leftarrow \Phi(x_k)$
- $k \leftarrow k + 1$
- jusqu'à** $\text{err} \leq \text{tol}$ ou $k > \text{kmax}$
- Si** $\text{err} \leq \text{tol}$ **alors** ▷ Convergence
- $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow x_k$ ▷ $|\Phi(\alpha_{\text{tol}}) - \alpha_{\text{tol}}| \leq \text{tol}$
- Fin Si**

Recherche des zéros d'une fonction Algorithme générique du point fixe 2023/10/02 36 / 80

Algorithme générique du point fixe

Algorithm Méthode de point fixe : version **Tantque** avec critères d'arrêt

Données :

- Φ : $\Phi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$,
- x_0 : donnée initiale, $x_0 \in \mathbb{R}$,
- tol : la tolérance, $\text{tol} \in \mathbb{R}^+$,
- kmax : nombre maximum d'itérations, $\text{kmax} \in \mathbb{N}^*$

Résultat :

α_{tol} : un réel tel que $|\Phi(\alpha_{\text{tol}}) - \alpha_{\text{tol}}| \leq \text{tol}$
(ou $\frac{|\Phi(\alpha_{\text{tol}}) - \alpha_{\text{tol}}|}{|\alpha_{\text{tol}}| + 1} \leq \text{tol}$)

- Fonction** $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow \text{PtFIXE}(\Phi, x_0, \text{tol}, \text{kmax})$
- $k \leftarrow 0, \alpha_{\text{tol}} \leftarrow \emptyset$
- $x \leftarrow x_0, \text{fx} \leftarrow \Phi(x_0)$,
- $\text{err} \leftarrow |\text{fx} - x|$ ▷ ou $\frac{|\text{fx} - x|}{|x| + 1}$
- Tantque** $\text{err} > \text{tol}$ et $k \leq \text{kmax}$ **faire**
- $k \leftarrow k + 1$
- $x \leftarrow \text{fx}$
- $\text{fx} \leftarrow \Phi(x)$
- $\text{err} \leftarrow |\text{fx} - x|$ ▷ ou $\frac{|\text{fx} - x|}{|x| + 1}$
- Fin Tantque**
- Si** $\text{err} \leq \text{tol}$ **alors** ▷ Convergence
- $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow x$
- Fin Si**
- Fin Fonction**

Algorithm Méthode de point fixe : version **Répéter** avec critères d'arrêt

Données :

- Φ : $\Phi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$,
- x_0 : donnée initiale, $x_0 \in \mathbb{R}$,
- tol : la tolérance, $\text{tol} \in \mathbb{R}^+$,
- kmax : nombre maximum d'itérations, $\text{kmax} \in \mathbb{N}^*$

Résultat :

α_{tol} : un réel tel que $|\Phi(\alpha_{\text{tol}}) - \alpha_{\text{tol}}| \leq \text{tol}$
(ou $\frac{|\Phi(\alpha_{\text{tol}}) - \alpha_{\text{tol}}|}{|\alpha_{\text{tol}}| + 1} \leq \text{tol}$)

- Fonction** $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow \text{PtFIXE}(\Phi, x_0, \text{tol}, \text{kmax})$
- $k \leftarrow 0, \alpha_{\text{tol}} \leftarrow \emptyset$
- $x \leftarrow x_0$
- Répéter**
- $xp \leftarrow x$
- $x \leftarrow \Phi(xp)$
- $\text{err} \leftarrow |x - xp|$ ▷ ou $\frac{|x - xp|}{|xp| + 1}$
- $k \leftarrow k + 1$
- jusqu'à** $\text{err} \leq \text{tol}$ ou $k > \text{kmax}$
- Si** $\text{err} \leq \text{tol}$ **alors** ▷ Convergence
- $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow x$
- Fin Si**
- Fin Fonction**

Recherche des zéros d'une fonction Algorithme générique du point fixe 2023/10/02 37 / 80

Plan

- 1 Recherche des zéros d'une fonction
 - Méthode de dichotomie ou de bisection
 - Points fixes d'une fonction (dimension 1)
 - Points fixes attractifs et répulsifs
 - Algorithme générique du point fixe
 - Points fixes pour la recherche de racines
- 2 Résolution de systèmes non linéaires
 - Méthode de la corde
 - La méthode de Newton
 - Méthode de la sécante
 - Point fixe
 - Méthode de Newton
 - Exemples

Applications à la recherche de racines

$f(x) = 0 \iff \Phi(x) \stackrel{\text{def}}{=} x + f(x) = x.$

si $\mathcal{F} \in \mathcal{C}^0$ tel que $\mathcal{F}(0) = 0$ alors

$f(x) = 0 \iff \Phi(x) \stackrel{\text{def}}{=} x + \mathcal{F}(f(x)) = x.$

Objectif : Construire une suite x_{k+1} tel que $|x_{k+1} - \alpha| \leq |x_k - \alpha|$;
 formule de taylor :

$f(\alpha) = 0 = f(x_k) + hf'(\xi)$ avec $h = \alpha - x_k.$

Soit $q_k \approx f'(\xi)$ et \tilde{h} solution de

$$f(x_k) + \tilde{h}q_k = 0$$

Si $q_k \neq 0$, on obtient la suite itérative $x_{k+1} = x_k + \tilde{h}$ i.e.

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{q_k}, \forall k \in \mathbb{N} \tag{11}$$

Applications à la recherche de racines

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{q_k}, \forall k \in \mathbb{N}$$

x_{k+1} : intersection droite de pente q_k passant par $((x_k), f(x_k))$ avec (Ox)

- **Méthode de la corde :**

$$q_k = q = \frac{f(b) - f(a)}{b - a}$$

- **Méthode de la sécante :**

$$q_k = \frac{f(x_k) - f(x_{k-1})}{x_k - x_{k-1}}$$

où x_{-1} et x_0 sont données,

- **Méthode de Newton :** en supposant f' connu, on prend

$$q_k = f'(x_k).$$

Plan

- 1 Recherche des zéros d'une fonction
 - Méthode de dichotomie ou de bisection
 - Points fixes d'une fonction (dimension 1)
 - Points fixes attractifs et répulsifs
 - Algorithme générique du point fixe
 - Points fixes pour la recherche de racines
- 2 Résolution de systèmes non linéaires
 - Méthode de la corde
 - La méthode de Newton
 - Méthode de la sécante
 - Point fixe
 - Méthode de Newton
 - Exemples

Méthode de la corde

Exercice 3:

Soit f une fonction de classe C^1 sur $[a, b]$ vérifiant $f(a)f(b) < 0$. et $\lambda = \frac{f(b)-f(a)}{b-a}$. Soit $x_0 \in [a, b]$ donné. La suite obtenue par la méthode de la corde est donnée par

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{\lambda}, \forall k \in \mathbb{N}.$$

On note $\Phi(x) = x - \frac{f(x)}{\lambda}$.

Q.1 Montrer que si pour tout $x \in [a, b]$ on a

$$\min(\lambda(x-a), \lambda(x-b)) \leq f(x) \leq \max(\lambda(x-a), \lambda(x-b)) \tag{12}$$

alors $\Phi([a, b]) \subset [a, b]$.

Q.2 Montrer que si pour tout $x \in [a, b]$ on a

$$\min(0, 2\lambda) < f'(x) < \max(0, 2\lambda) \tag{13}$$

alors $|\Phi'(x)| < 1$.

Q.3 En déduire que sous les deux conditions précédentes la méthode de la corde converge vers l'unique solution $\alpha \in [a, b]$ de $f(x) = 0$.

Méthode de la corde

$$x_{k+1} = x_k - \frac{b-a}{f(b)-f(a)} f(x_k), \forall k \in \mathbb{N}.$$

On pose $\Phi(x) = x - \frac{b-a}{f(b)-f(a)} f(x)$, alors $x_{k+1} = \Phi(x_k)$.

Proposition 4.2: convergence, méthode de la corde

Soit $f \in C^1([a, b])$ tel que $f(b) \neq f(a)$ et $\lambda = \frac{f(b)-f(a)}{b-a}$. On note $(x_k)_{k \in \mathbb{N}}$ la suite définie par $x_0 \in [a, b]$ et pour tout $k \geq 0$

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{\lambda}. \tag{14}$$

On suppose de plus que $\forall x \in [a, b]$

$$\min(\lambda(x-a), \lambda(x-b)) \leq f(x) \leq \max(\lambda(x-a), \lambda(x-b)) \tag{15}$$

$$\min(0, 2\lambda) < f'(x) < \max(0, 2\lambda) \tag{16}$$

alors la suite (x_k) converge vers l'unique racine $\alpha \in [a, b]$ de f .

Méthode de la corde

Proposition 4.3: ordre de convergence de la méthode de la corde

Soit $f \in C^1([a, b])$ tel que $f(b) \neq f(a)$. Si la suite (x_k) définie par la méthode de la corde en (14) converge vers $\alpha \in]a, b[$ alors la convergence est au moins d'ordre 1.

De plus, si f est de classe C^2 sur un certain voisinage \mathcal{V} de α et si $f'(\alpha) = \frac{f(b)-f(a)}{b-a}$ alors la convergence est au moins d'ordre 2.

Méthode de point fixe : version Tantque avec critères d'arrêt

```

Données :
Phi : Phi : R -> R ,
x0 : donnée initiale, x0 in R,
tol : la tolérance, tol in R+,
kmax : nombre maximum d'itérations, kmax in N*

Résultat :
alpha : un réel tel que |Phi(alpha) - alpha| <= tol
        (ou |Phi(alpha) - alpha| / |alpha| <= tol)

1: Fonction alpha <- PrFIXE ( Phi, x0, tol, kmax )
2: k <- 0, alpha <- x0
3: x <- x0
4: err <- tol + 1
5: Tantque err > tol et k <= kmax faire
6:   k <- k + 1
7:   xp <- x
8:   x <- Phi(xp)
9:   err <- |x - xp|
10: Fin Tantque
11: Si err <= tol alors
12:   alpha <- x
13: Fin Si
14: Fin Fonction
    
```

Méthode de la corde

$$\Phi(x) = x - \frac{b-a}{f(b)-f(a)} f(x)$$

\triangleright ou $\frac{|xp-x|}{|x|+1}$
 \triangleright Convergence

Méthode de point fixe : version **Tantque** avec critères d'arrêt

Données :
 Φ : $\Phi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$,
 x_0 : donnée initiale, $x_0 \in \mathbb{R}$,
 tol : la tolérance, $\text{tol} \in \mathbb{R}^+$,
 kmax : nombre maximum d'itérations, $\text{kmax} \in \mathbb{N}^*$

Résultat :
 α_{tol} : un réel tel que $|\Phi(\alpha_{\text{tol}}) - \alpha_{\text{tol}}| \leq \text{tol}$
(ou $\frac{|\Phi(\alpha_{\text{tol}}) - \alpha_{\text{tol}}|}{|\alpha_{\text{tol}}|+1} \leq \text{tol}$)

```

1: Fonction  $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow \text{PrFixe}(\Phi, x_0, \text{tol}, \text{kmax})$ 
2:  $k \leftarrow 0, \alpha_{\text{tol}} \leftarrow \emptyset$ 
3:  $x \leftarrow x_0$ 
4:  $\text{err} \leftarrow \text{tol} + 1$ 
5: Tantque  $\text{err} > \text{tol}$  et  $k \leq \text{kmax}$  faire
6:    $k \leftarrow k + 1$ 
7:    $xp \leftarrow x$ 
8:    $x \leftarrow \Phi(xp)$ 
9:    $\text{err} \leftarrow |x - xp|$ 
10: Fin Tantque
11: Si  $\text{err} \leq \text{tol}$  alors
12:    $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow x$ 
13: Fin Si
14: Fin Fonction

```

▷ ou $\frac{|xp-x|}{|x|+1}$
▷ Convergence

Algorithm Méthode de la corde

Données :
 f : $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$,
 a, b : deux réels tels que $f(a) \neq f(b)$,
 x_0 : donnée initiale, $x_0 \in \mathbb{R}$,
 tol : la tolérance, $\text{tol} \in \mathbb{R}^+$,
 kmax : nombre maximum d'itérations, $\text{kmax} \in \mathbb{N}^*$

Résultat :
 α_{tol} : un réel tel que $|f(\alpha_{\text{tol}})| \leq \text{tol}$

```

1: Fonction  $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow \text{Corde}(f, a, b, x_0, \text{tol}, \text{kmax})$ 
2:  $k \leftarrow 0, \alpha_{\text{tol}} \leftarrow \emptyset$ 
3:  $q \leftarrow \frac{b-f(b)}{f(b)-f(a)}$ 
4:  $x \leftarrow x_0$ 
5:  $\text{err} \leftarrow \text{tol} + 1$ 
6: Tantque  $\text{err} > \text{tol}$  et  $k \leq \text{kmax}$  faire
7:    $k \leftarrow k + 1$ 
8:    $xp \leftarrow x$ 
9:    $x \leftarrow xp - q * f(xp)$ 
10:    $\text{err} \leftarrow |x - xp|$ 
11: Fin Tantque
12: Si  $\text{err} \leq \text{tol}$  alors
13:    $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow x$ 
14: Fin Si
15: Fin Fonction

```

▷ Convergence

Plus simple, plus court ... ???

Méthode de point fixe : version **Tantque** avec critères d'arrêt

Données :
 Φ : $\Phi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$,
 x_0 : donnée initiale, $x_0 \in \mathbb{R}$,
 tol : la tolérance, $\text{tol} \in \mathbb{R}^+$,
 kmax : nombre maximum d'itérations, $\text{kmax} \in \mathbb{N}^*$

Résultat :
 α_{tol} : un réel tel que $|\Phi(\alpha_{\text{tol}}) - \alpha_{\text{tol}}| \leq \text{tol}$
(ou $\frac{|\Phi(\alpha_{\text{tol}}) - \alpha_{\text{tol}}|}{|\alpha_{\text{tol}}|+1} \leq \text{tol}$)

```

1: Fonction  $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow \text{PrFixe}(\Phi, x_0, \text{tol}, \text{kmax})$ 
2:  $k \leftarrow 0, \alpha_{\text{tol}} \leftarrow \emptyset$ 
3:  $x \leftarrow x_0$ 
4:  $\text{err} \leftarrow \text{tol} + 1$ 
5: Tantque  $\text{err} > \text{tol}$  et  $k \leq \text{kmax}$  faire
6:    $k \leftarrow k + 1$ 
7:    $xp \leftarrow x$ 
8:    $x \leftarrow \Phi(xp)$ 
9:    $\text{err} \leftarrow |x - xp|$ 
10: Fin Tantque
11: Si  $\text{err} \leq \text{tol}$  alors
12:    $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow x$ 
13: Fin Si
14: Fin Fonction

```

▷ ou $\frac{|xp-x|}{|x|+1}$
▷ Convergence

Algorithm Méthode de la corde utilisant la fonction **PrFixe**

Données :
 f : $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$,
 a, b : deux réels tels que $f(a) \neq f(b)$,
 x_0 : donnée initiale, $x_0 \in \mathbb{R}$,
 tol : la tolérance, $\text{tol} \in \mathbb{R}^+$,
 kmax : nombre maximum d'itérations, $\text{kmax} \in \mathbb{N}^*$

Résultat :
 α_{tol} : un réel tel que $|f(\alpha_{\text{tol}})| \leq \text{tol}$

```

1: Fonction  $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow \text{Corde}(f, a, b, x_0, \text{tol}, \text{kmax})$ 
2:  $q \leftarrow \frac{b-f(b)}{f(b)-f(a)}$ 
3:  $\Phi \leftarrow (x \mapsto x - q * f(x))$ 
4:  $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow \text{PrFixe}(\Phi, x_0, \text{tol}, \text{kmax})$ 
5: Fin Fonction

```

▷ définition de fonction

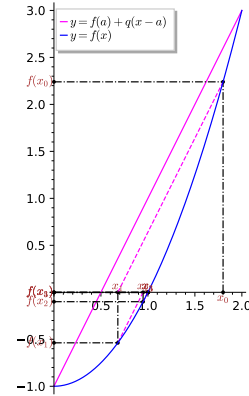
Plus simple, plus court ... ???

$\alpha = 1$, racine de $f : x \mapsto x^2 - 1$

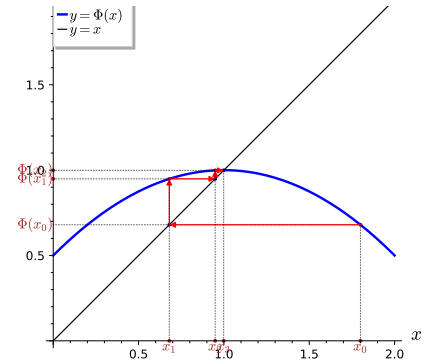
- exemple 1 : $a = 0.000$, $b = 2.000$, $x_0 = 1.800$,
- exemple 2 : $a = 0.5000$, $b = 1.900$, $x_0 = 1.800$.

	exemple 1	exemple 2
k	$ x_k - \alpha $	$ x_k - \alpha $
0	8.0000e-01	8.0000e-01
1	3.2000e-01	1.3333e-01
2	5.1200e-02	2.9630e-02
3	1.3107e-03	5.3041e-03
4	8.5899e-07	8.9573e-04
5	3.6893e-13	1.4962e-04
6	0.0000e+00	2.4947e-05
⋮	⋮	⋮
15	0.0000e+00	2.4756e-12

L'exemple 1 converge beaucoup plus rapidement

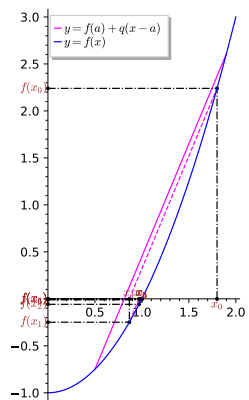


(a) représentation usuelle

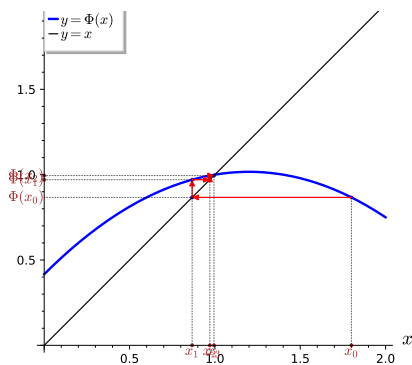


(b) Représentation point fixe

Figure: Exemple 1, méthode de la corde, $\alpha = 1$, racine de $f : x \mapsto x^2 - 1$ avec $a = 0.00$, $b = 2.00$, $x_0 = 1.80$.

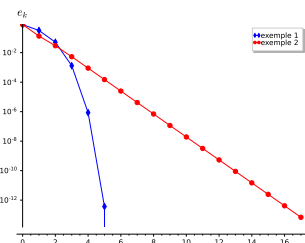


(a) représentation usuelle

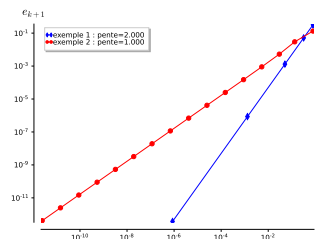


(b) Représentation point fixe

Figure: Exemple 2, méthode de la corde, $\alpha = 1$, racine de $f : x \mapsto x^2 - 1$ avec $a = 0.50$, $b = 1.90$, $x_0 = 1.80$.



(a) Erreurs en fonctions des itérations



(b) Représentation en échelle logarithmique de e_{k+1} en fonction de e_k . Les pentes sont calculées numériquement

Figure: Exemples 1 et 2, méthode de la corde, $\alpha = 1$, racine de $f : x \mapsto x^2 - 1$

Exemple 1 : $\frac{f(b)-f(a)}{b-a} = 2$ et $f'(\alpha) = 2 \Rightarrow$ convergence ordre 2.

Exemple 2 : $\frac{f(b)-f(a)}{b-a} = 2.400 \neq f'(\alpha) = 2 \Rightarrow$ convergence ordre 1.

Plan

- 1 Recherche des zéros d'une fonction
 - Méthode de dichotomie ou de bisection
 - Points fixes d'une fonction (dimension 1)
 - Points fixes attractifs et répulsifs
 - Algorithme générique du point fixe
 - Points fixes pour la recherche de racines
- 2 Résolution de systèmes non linéaires
 - Point fixe
 - Méthode de Newton
 - Exemples

Méthode de Newton

Proposition 4.4: convergence de la méthode de Newton

Soit f une fonction de classe \mathcal{C}^2 sur un certain voisinage d'une racine simple α de f . Soit x_0 donné dans ce voisinage, la suite $(x_k)_{k \in \mathbb{N}}$ définie par la méthode de Newton

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)}, \quad \forall k \in \mathbb{N}. \quad (17)$$

est localement convergente d'ordre 2.

Exercice 4:

En -1700 av. J.-C., les babyloniens ne connaissaient que les nombres rationnels (fractions) et ils utilisaient le système sexagésimal (base 60). Pour approcher la valeur $\sqrt{2}$, ils utilisaient comme approximation (voir tablette YBC 7289)

$$\alpha = 1 + \frac{24}{60} + \frac{51}{60^2} + \frac{10}{60^3} = \frac{30547}{21600}$$

L'erreur commise est $|\alpha - \sqrt{2}| \approx 5.994e-7$.



Q.1 Comment feriez-vous pour trouver à la main une méthode permettant de trouver des nombres rationnels approchant $\sqrt{2}$.

Q.2 Généraliser la méthode pour trouver une approximation rationnelle de \sqrt{a} où a est un réel positif.

Q.3 Généraliser la méthode pour trouver une approximation rationnelle de $\sqrt[n]{a}$ où a est un réel positif et $n \in \mathbb{N}^*$.

Méthode de point fixe : version **Tantque** avec critères d'arrêt

Données :

- Φ : $\Phi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$,
- x_0 : donnée initiale, $x_0 \in \mathbb{R}$,
- tol : la tolérance, $\text{tol} \in \mathbb{R}^+$,
- kmax : nombre maximum d'itérations, $\text{kmax} \in \mathbb{N}^*$

Résultat :

- α_{tol} : un réel tel que $|\Phi(\alpha_{\text{tol}}) - \alpha_{\text{tol}}| \leq \text{tol}$
(ou $\frac{|\Phi(\alpha_{\text{tol}}) - \alpha_{\text{tol}}|}{|\alpha_{\text{tol}}|+1} \leq \text{tol}$)

- 1: **Fonction** $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow \text{PTFIXE}(\Phi, x_0, \text{tol}, \text{kmax})$
- 2: $k \leftarrow 0, \alpha_{\text{tol}} \leftarrow \emptyset$
- 3: $x \leftarrow x_0$,
- 4: $\text{err} \leftarrow \text{tol} + 1$
- 5: **Tantque** $\text{err} > \text{tol}$ et $k \leq \text{kmax}$ **faire**
- 6: $k \leftarrow k + 1$
- 7: $xp \leftarrow x$
- 8: $x \leftarrow \Phi(xp)$
- 9: $\text{err} \leftarrow |x - xp|$ ▷ ou $\frac{|xp-x|}{|x|+1}$
- 10: **Fin Tantque**
- 11: **Si** $\text{err} \leq \text{tol}$ **alors** ▷ Convergence
- 12: $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow x$
- 13: **Fin Si**
- 14: **Fin Fonction**

Méthode de Newton :

$$\Phi(x) = x - \frac{f(x)}{f'(x)}$$

Méthode de point fixe : version **Tantque** avec critères d'arrêt

Données :

- Φ : $\Phi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$,
- x_0 : donnée initiale, $x_0 \in \mathbb{R}$,
- tol : la tolérance, $\text{tol} \in \mathbb{R}^+$,
- kmax : nombre maximum d'itérations, $\text{kmax} \in \mathbb{N}^*$

Résultat :

- α_{tol} : un réel tel que $|\Phi(\alpha_{\text{tol}}) - \alpha_{\text{tol}}| \leq \text{tol}$
(ou $\frac{|\Phi(\alpha_{\text{tol}}) - \alpha_{\text{tol}}|}{|\alpha_{\text{tol}}|+1} \leq \text{tol}$)

- 1: **Fonction** $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow \text{PTFIXE}(\Phi, x_0, \text{tol}, \text{kmax})$
- 2: $k \leftarrow 0, \alpha_{\text{tol}} \leftarrow \emptyset$
- 3: $x \leftarrow x_0$,
- 4: $\text{err} \leftarrow \text{tol} + 1$
- 5: **Tantque** $\text{err} > \text{tol}$ et $k \leq \text{kmax}$ **faire**
- 6: $k \leftarrow k + 1$
- 7: $xp \leftarrow x$
- 8: $x \leftarrow \Phi(xp)$
- 9: $\text{err} \leftarrow |x - xp|$ ▷ ou $\frac{|xp-x|}{|x|+1}$
- 10: **Fin Tantque**
- 11: **Si** $\text{err} \leq \text{tol}$ **alors** ▷ Convergence
- 12: $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow x$
- 13: **Fin Si**
- 14: **Fin Fonction**

Algorithm Méthode de Newton

Données :

- f : $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$,
- df : la dérivée de f ,
- x_0 : donnée initiale, $x_0 \in \mathbb{R}$,
- tol : la tolérance, $\text{tol} \in \mathbb{R}^+$,
- kmax : nombre maximum d'itérations, $\text{kmax} \in \mathbb{N}^*$

Résultat :

- α_{tol} : un réel tel que $|\Phi(\alpha_{\text{tol}}) - \alpha_{\text{tol}}| \leq \text{tol}$

- 1: **Fonction** $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow \text{NEWTON}(f, \text{df}, x_0, \text{tol}, \text{kmax})$
- 2: $k \leftarrow 0, \alpha_{\text{tol}} \leftarrow \emptyset$
- 3: $x \leftarrow x_0$,
- 4: $\text{err} \leftarrow \text{tol} + 1$
- 5: **Tantque** $\text{err} > \text{tol}$ et $k \leq \text{kmax}$ **faire**
- 6: $k \leftarrow k + 1$
- 7: $xp \leftarrow x$
- 8: $x \leftarrow xp - f(xp)/\text{df}(xp)$ ▷ $\text{df}(xp) \neq 0$
- 9: $\text{err} \leftarrow |x - xp|$
- 10: **Fin Tantque**
- 11: **Si** $\text{err} \leq \text{tol}$ **alors** ▷ Convergence
- 12: $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow x$
- 13: **Fin Si**
- 14: **Fin Fonction**

Plus simple, plus court ... ???

Méthode de point fixe : version **Tantque** avec critères d'arrêt

Données :

- Φ : $\Phi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$,
- x_0 : donnée initiale, $x_0 \in \mathbb{R}$,
- tol : la tolérance, $\text{tol} \in \mathbb{R}^+$,
- kmax : nombre maximum d'itérations, $\text{kmax} \in \mathbb{N}^*$

Résultat :

- α_{tol} : un réel tel que $|\Phi(\alpha_{\text{tol}}) - \alpha_{\text{tol}}| \leq \text{tol}$
(ou $\frac{|\Phi(\alpha_{\text{tol}}) - \alpha_{\text{tol}}|}{|\alpha_{\text{tol}}|+1} \leq \text{tol}$)

- 1: **Fonction** $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow \text{PTFIXE}(\Phi, x_0, \text{tol}, \text{kmax})$
- 2: $k \leftarrow 0, \alpha_{\text{tol}} \leftarrow \emptyset$
- 3: $x \leftarrow x_0$,
- 4: $\text{err} \leftarrow \text{tol} + 1$
- 5: **Tantque** $\text{err} > \text{tol}$ et $k \leq \text{kmax}$ **faire**
- 6: $k \leftarrow k + 1$
- 7: $xp \leftarrow x$
- 8: $x \leftarrow \Phi(xp)$
- 9: $\text{err} \leftarrow |x - xp|$ ▷ ou $\frac{|xp-x|}{|x|+1}$
- 10: **Fin Tantque**
- 11: **Si** $\text{err} \leq \text{tol}$ **alors** ▷ Convergence
- 12: $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow x$
- 13: **Fin Si**
- 14: **Fin Fonction**

Algorithm Méthode de Newton scalaire

Données :

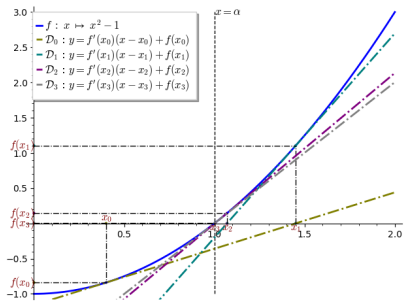
- f : $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$,
- df : la dérivée de f ,
- x_0 : donnée initiale, $x_0 \in \mathbb{R}$,
- tol : la tolérance, $\text{tol} \in \mathbb{R}^+$,
- kmax : nombre maximum d'itérations, $\text{kmax} \in \mathbb{N}^*$

Résultat :

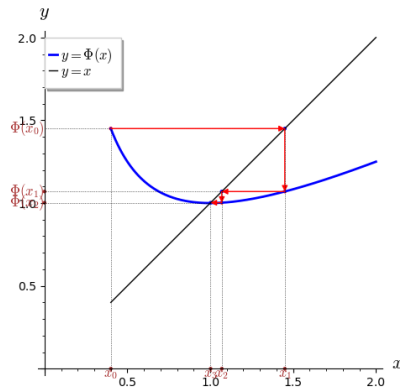
- α_{tol} : un réel tel que

- 1: **Fonction** $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow \text{NEWTON}(f, \text{df}, x_0, \text{tol}, \text{kmax})$
- 2: $\Phi \leftarrow (x \mapsto x - f(x)/\text{df}(x))$
- 3: $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow \text{PTFIXE}(\Phi, x_0, \text{tol}, \text{kmax})$
- 4: **Fin Fonction**

Plus simple, plus court ... ???

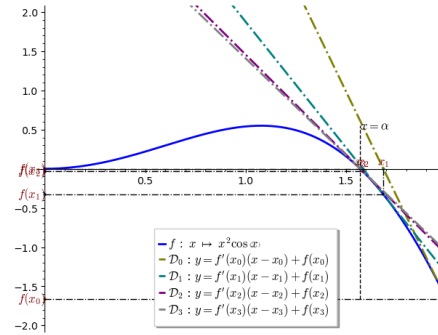


(a) représentation usuelle

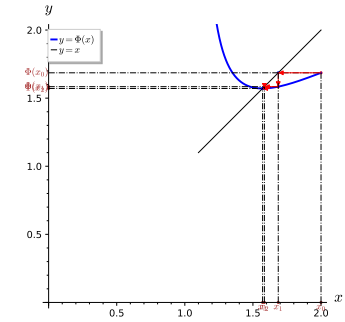


(b) Représentation point fixe avec
 $\Phi : x \mapsto x - \frac{x^2 - 1}{2x}$

Figure: Exemple 1, méthode de Newton, $\alpha = 1$, racine de $f : x \mapsto x^2 - 1$ avec $x_0 = 0.40$,

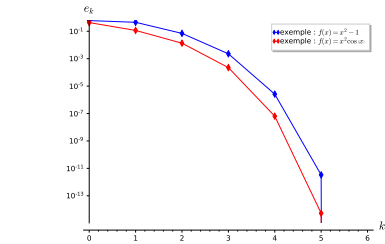


(a) représentation usuelle

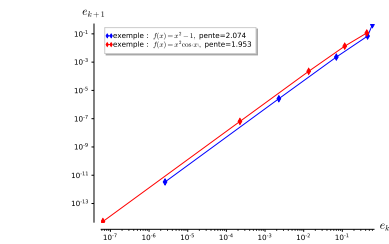


(b) Représentation point fixe avec
 $\Phi : x \mapsto \frac{x^2 \cos(x)}{x^2 \sin(x) - 2x \cos(x)} + x$

Figure: Exemple 2, méthode de Newton, $\alpha = \frac{1}{2} \pi$, racine de $f : x \mapsto x^2 \cos(x)$ avec $x_0 = 2.00$,



(a) Représentation de la convergence, e_k en fonction de k



(b) Représentation de l'ordre de convergence en échelle logarithmique, e_{k+1} en fonction de e_k . Ordre théorique 2

Figure: Méthode de Newton, convergence et ordre

Plan

- 1 Recherche des zéros d'une fonction
 - Méthode de dichotomie ou de bisection
 - Points fixes d'une fonction (dimension 1)
 - Points fixes attractifs et répulsifs
 - Algorithme générique du point fixe
 - Points fixes pour la recherche de racines
- 2 Résolution de systèmes non linéaires
 - Point fixe
 - Méthode de Newton
 - Exemples

Alternative à la méthode de Newton lorsque l'on ne connaît pas la dérivée de la fonction f :

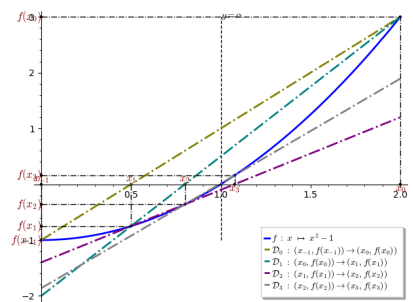
$$f'(x_k) \approx \frac{f(x_k) - f(x_{k-1})}{x_k - x_{k-1}}$$

Proposition 4.5: Convergence méthode de la sécante (Admis)

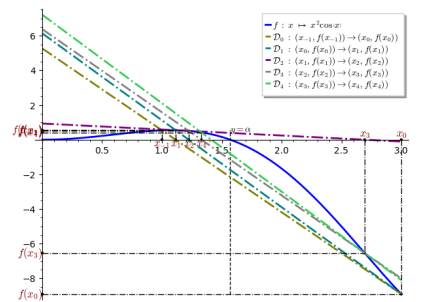
Soit f une fonction de classe C^2 sur un certain voisinage d'une racine simple α de f . Soient x_{-1} et x_0 donnés dans ce voisinage tels que $f(x_{-1}) \neq f(x_0)$, la suite $(x_k)_{k \in \mathbb{N}}$ définie par la méthode de la sécante

$$x_{k+1} = x_k - \frac{x_k - x_{k-1}}{f(x_k) - f(x_{k-1})} f(x_k), \forall k \in \mathbb{N} \tag{18}$$

est localement convergente d'ordre $\frac{1+\sqrt{5}}{2} \approx 1.618$.

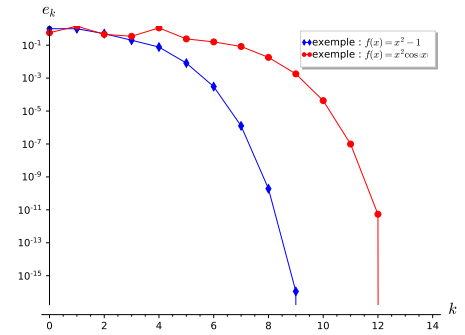


(a) $f(x) = x^2 - 1, x_{-1} = 0.000$ et $x_0 = 2.000$

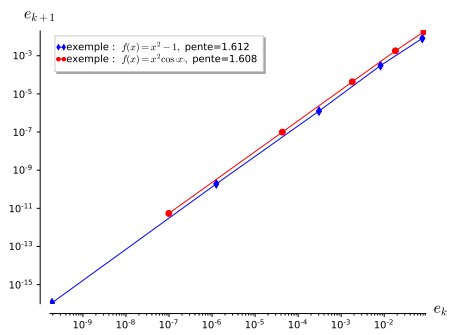


(b) $f(x) = x^2 \cos(x), x_{-1} = 1.000$ et $x_0 = 3.000$

Figure: Méthode de la sécante



(a) Représentation de la convergence, e_k en fonction de k



(b) Représentation de l'ordre de convergence en échelle logarithmique, e_{k+1} en fonction de e_k . Ordre théorique $\frac{1+\sqrt{5}}{2} \approx 1.618$

Figure: Méthode de la sécante, convergence et ordre

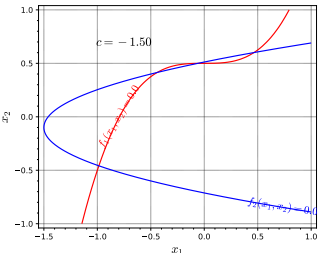
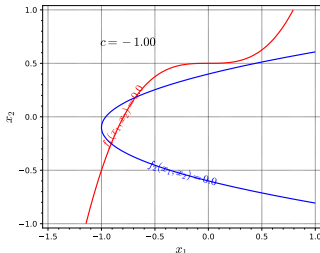
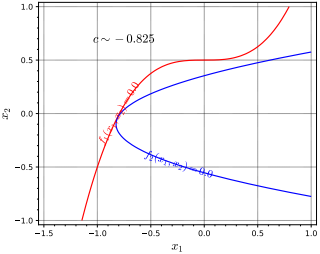
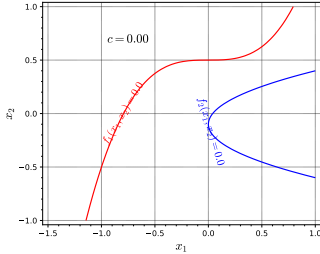
Plan

- 1 Recherche des zéros d'une fonction
- 2 Résolution de systèmes non linéaires
 - Point fixe
 - Méthode de Newton
 - Exemples

Résolution de systèmes non linéaires

Soit $c \in \mathbb{R}$ donné.

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2) = -x_1^3 + x_2 - \frac{1}{2} = 0 \\ f_2(x_1, x_2) = \frac{1}{25} (10x_2 + 1)^2 + c - x_1 = 0. \end{cases} \quad (19)$$



Soient $U \subset \mathbb{R}^N$ un ouvert et $f \in C^0(U; \mathbb{R}^N)$

Trouver $\alpha \in U \subset \mathbb{R}^N$ tel que

$$f(\alpha) = 0 \iff \begin{cases} f_1(\alpha_1, \dots, \alpha_N) = 0 \\ f_2(\alpha_1, \dots, \alpha_N) = 0 \\ \vdots \\ f_N(\alpha_1, \dots, \alpha_N) = 0 \end{cases}$$

On pose, par ex., $\Phi(x) = x + f(x)$, : $f(x) = 0 \iff \Phi(x) = x$ **Point fixe**

Trouver $\alpha \in U \subset \mathbb{R}^N$ tel que

$$\Phi(\alpha) = \alpha \iff \begin{cases} \Phi_1(\alpha_1, \dots, \alpha_N) = \alpha_1 \\ \Phi_2(\alpha_1, \dots, \alpha_N) = \alpha_2 \\ \vdots \\ \Phi_N(\alpha_1, \dots, \alpha_N) = \alpha_N \end{cases}$$

Plan

- 1 Recherche des zéros d'une fonction
 - Méthode de dichotomie ou de bisection
 - Points fixes d'une fonction (dimension 1)
 - Points fixes attractifs et répulsifs
 - Algorithme générique du point fixe
 - Points fixes pour la recherche de racines
- 2 Résolution de systèmes non linéaires
 - Point fixe
 - Méthode de Newton
 - Exemples
- Méthode de la corde
- La méthode de Newton
- Méthode de la sécante



Théorème 5.1: Point fixe de Banach ★★★★★



Soit \mathcal{B} un espace de Banach et $U \subset \mathcal{B}$ un sous-ensemble fermé. On suppose que $\Phi : U \rightarrow U$ est une application strictement contractante, i.e.

$$\exists L \in]0, 1[, \quad \|\Phi(\mathbf{x}) - \Phi(\mathbf{y})\| \leq L \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|, \quad \forall (\mathbf{x}, \mathbf{y}) \in U \times U. \quad (20)$$

Alors

- 1 Φ admet un unique point fixe $\alpha \in U$ (i.e. unique solution de $\mathbf{x} = \Phi(\mathbf{x})$).
- 2 La suite des itérés $\mathbf{x}^{[k+1]} = \Phi(\mathbf{x}^{[k]})$ converge vers α pour toute valeur initiale $\mathbf{x}^{[0]} \in U$.
- 3 Pour tout $k \in \mathbb{N}$,

$$\|\alpha - \mathbf{x}^{[k]}\| \leq \frac{L^{k-1}}{1-L} \|\mathbf{x}^{[1]} - \mathbf{x}^{[0]}\|, \quad 0 \leq l \leq k \quad (21)$$

Plan

- 1 Recherche des zéros d'une fonction
 - Méthode de dichotomie ou de bissection
 - Points fixes d'une fonction (dimension 1)
 - Points fixes attractifs et répulsifs
 - Algorithme générique du point fixe
 - Points fixes pour la recherche de racines
- 2 Résolution de systèmes non linéaires
 - Méthode de la corde
 - La méthode de Newton
 - Méthode de la sécante
 - Point fixe
 - Méthode de Newton
 - Exemples

$f : \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}^N$ une fonction suffisamment régulière. On définit la **matrice Jacobienne de f** , notée J_f , par

$$J_f = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_N} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_N}{\partial x_1} & \frac{\partial f_N}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_N}{\partial x_N} \end{pmatrix}$$

On a alors $\forall \mathbf{h} \in \mathbb{R}^N$ à l'ordre 1

$$f(\mathbf{x} + \mathbf{h}) \approx f(\mathbf{x}) + J_f(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{h}. \quad (22)$$

On a $\forall \mathbf{h} \in \mathbb{R}^N$ à l'ordre 1

$$f(\mathbf{x} + \mathbf{h}) \approx f(\mathbf{x}) + J_f(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{h}. \quad (23)$$

trouver α tel que $f(\alpha) = 0$.

Si $\mathbf{x}^{[k]}$ est proche de α , alors avec $\mathbf{x} = \mathbf{x}^{[k]}$ et $\alpha = \mathbf{x}^{[k]} + \mathbf{h}$

$$f(\alpha) \approx f(\mathbf{x}^{[k]}) + J_f(\mathbf{x}^{[k]}) \cdot \mathbf{h}$$

On résout le système linéarisé

$$f(\mathbf{x}^{[k]}) + J_f(\mathbf{x}^{[k]}) \cdot \tilde{\mathbf{h}} = 0 \Leftrightarrow J_f(\mathbf{x}^{[k]}) \cdot \tilde{\mathbf{h}} = -f(\mathbf{x}^{[k]}).$$

On pose $\Phi(\mathbf{x}) = \mathbf{x} - (J_f(\mathbf{x}))^{-1} f(\mathbf{x})$. la **méthode de Newton** s'écrit alors

$$\mathbf{x}^{[k+1]} = \Phi(\mathbf{x}^{[k]}) = \mathbf{x}^{[k]} - \left(J_f(\mathbf{x}^{[k]}) \right)^{-1} f(\mathbf{x}^{[k]}) \quad (24)$$

Théorème 5.2: (Admis)

Soit $f \in \mathcal{C}^3(\mathbb{R}^N; \mathbb{R}^N)$. On suppose que la matrice Jacobienne appliquée en \mathbf{x} , $J_f(\mathbf{x})$ est inversible dans un voisinage de α , avec $f(\alpha) = 0$. Alors pour tout $\mathbf{x}^{[0]}$ suffisamment proche de α la suite définie par

$$\mathbf{x}^{[k+1]} = \mathbf{x}^{[k]} - \left((J_f(\mathbf{x}^{[k]}))^{-1} f(\mathbf{x}^{[k]}) \right)$$

converge vers α et la convergence est d'ordre 2.

Comment fait-on pour calculer $-(J_f(\mathbf{x}^{[k]}))^{-1} f(\mathbf{x}^{[k]})$?

Théorème 5.3: (Admis)

Soit $f \in \mathcal{C}^3(\mathbb{R}^N; \mathbb{R}^N)$. On suppose que la matrice Jacobienne appliquée en \mathbf{x} , $J_f(\mathbf{x})$ est inversible dans un voisinage de α , avec $f(\alpha) = 0$. Alors pour tout $\mathbf{x}^{[0]}$ suffisamment proche de α la suite définie par

$$\mathbf{x}^{[k+1]} = \mathbf{x}^{[k]} - \left((J_f(\mathbf{x}^{[k]}))^{-1} f(\mathbf{x}^{[k]}) \right)$$

converge vers α et la convergence est d'ordre 2.

Comment fait-on pour calculer $-(J_f(\mathbf{x}^{[k]}))^{-1} f(\mathbf{x}^{[k]})$?

On résoud le système linéaire

$$\left((J_f(\mathbf{x}^{[k]})) \right) \mathbf{h} = -f(\mathbf{x}^{[k]})$$

Remarque : Si l'on ne connaît pas explicitement la Jacobienne de f , il est possible de calculer une approximation de celle-ci en utilisant des formules de **dérivation numérique**.

Méthode de Newton scalaire

Données :

- f : $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$,
- df : la dérivée de f ,
- x_0 : donnée initiale, $x_0 \in \mathbb{R}$,
- tol : la tolérance, $tol \in \mathbb{R}^+$,
- kmax : nombre maximum d'itérations, $kmax \in \mathbb{N}^*$

Résultat :

α_{tol} : un réel tel que

- 1: **Fonction** $\alpha_{tol} \leftarrow \text{NEWTON} (f, df, x_0, tol, kmax)$
- 2: $k \leftarrow 0, \alpha_{tol} \leftarrow \emptyset$
- 3: $x \leftarrow x_0$,
- 4: err $\leftarrow tol + 1$
- 5: **Tantque** err > tol et $k \leq kmax$ **faire**
- 6: $k \leftarrow k + 1$
- 7: $xp \leftarrow x$
- 8: $x \leftarrow xp - f(xp)/df(xp)$ $\triangleright x \leftarrow \Phi(xp)$
- 9: err $\leftarrow |x - xp|$
- 10: **Fin Tantque**
- 11: **Si** err $\leq tol$ **alors**
- 12: $\alpha_{tol} \leftarrow x$
- 13: **Fin Si**
- 14: **Fin Fonction**

Méthode de Newton vectorielle :

$$\Phi(\mathbf{x}) = \mathbf{x} - \left((J_f(\mathbf{x}))^{-1} f(\mathbf{x}) \right)$$

Méthode de Newton scalaire

Données :

- f : $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$,
- df : la dérivée de f ,
- x_0 : donnée initiale, $x_0 \in \mathbb{R}$,
- tol : la tolérance, $tol \in \mathbb{R}^+$,
- kmax : nombre maximum d'itérations, $kmax \in \mathbb{N}^*$

Résultat :

α_{tol} : un réel tel que

- 1: **Fonction** $\alpha_{tol} \leftarrow \text{NEWTON} (f, df, x_0, tol, kmax)$
- 2: $k \leftarrow 0, \alpha_{tol} \leftarrow \emptyset$
- 3: $x \leftarrow x_0$,
- 4: err $\leftarrow tol + 1$
- 5: **Tantque** err > tol et $k \leq kmax$ **faire**
- 6: $k \leftarrow k + 1$
- 7: $xp \leftarrow x$
- 8: $x \leftarrow xp - f(xp)/df(xp)$ $\triangleright x \leftarrow \Phi(xp)$
- 9: err $\leftarrow |x - xp|$
- 10: **Fin Tantque**
- 11: **Si** err $\leq tol$ **alors**
- 12: $\alpha_{tol} \leftarrow x$
- 13: **Fin Si**
- 14: **Fin Fonction**

Algorithm Méthode de Newton vectorielle

Données :

- f : $f : \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}^N$,
- Jf : la matrice Jacobienne de f ,
- \mathbf{x}_0 : donnée initiale, $\mathbf{x}_0 \in \mathbb{R}^N$,
- tol : la tolérance, $tol \in \mathbb{R}^+$,
- kmax : nombre maximum d'itérations, $kmax \in \mathbb{N}^*$

Résultat :

α_{tol} : un élément de \mathbb{R}^N proche de α .

- 1: **Fonction** $\alpha_{tol} \leftarrow \text{NEWTON} (f, Jf, \mathbf{x}_0, tol, kmax)$
- 2: $k \leftarrow 0, \alpha_{tol} \leftarrow \emptyset$
- 3: $\mathbf{x} \leftarrow \mathbf{x}_0$,
- 4: err $\leftarrow tol + 1$
- 5: **Tantque** err > tol et $k \leq kmax$ **faire**
- 6: $k \leftarrow k + 1$
- 7: $\mathbf{x}p \leftarrow \mathbf{x}$
- 8: $\mathbf{h} \leftarrow \text{SOLVE}(Jf(\mathbf{x}p), -f(\mathbf{x}p))$
- 9: $\mathbf{x} \leftarrow \mathbf{x}p + \mathbf{h}$
- 10: err $\leftarrow \text{NORM}(\mathbf{x} - \mathbf{x}p)$
- 11: **Fin Tantque**
- 12: **Si** err $\leq tol$ **alors** \triangleright Convergence
- 13: $\alpha_{tol} \leftarrow \mathbf{x}$
- 14: **Fin Si**
- 15: **Fin Fonction**

Rappel : Point fixe scalaire. Et le cas vectoriel ... ???

Méthode de point fixe scalaire

Données :

Φ : $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$,
 x_0 : donnée initiale, $x_0 \in \mathbb{R}$,
 tol : la tolérance, $\text{tol} \in \mathbb{R}^+$,
 kmax : nombre maximum d'itérations, $\text{kmax} \in \mathbb{N}^*$

Résultat :

α_{tol} : un réel tel que $|\Phi(\alpha_{\text{tol}}) - \alpha_{\text{tol}}| \leq \text{tol}$
 (ou $\frac{|\Phi(\alpha_{\text{tol}}) - \alpha_{\text{tol}}|}{|\alpha_{\text{tol}}| + 1} \leq \text{tol}$)

```

1: Fonction  $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow \text{PtFixe}(\Phi, x_0, \text{tol}, \text{kmax})$ 
2:  $k \leftarrow 0, \alpha_{\text{tol}} \leftarrow \emptyset$ 
3:  $x \leftarrow x_0, \text{fx} \leftarrow \Phi(x_0)$ ,
4:  $\text{err} \leftarrow |\text{fx} - x|$ 
5: Tantque  $\text{err} > \text{tol}$  et  $k \leq \text{kmax}$  faire
6:    $k \leftarrow k + 1$ 
7:    $x \leftarrow \text{fx}$ 
8:    $\text{fx} \leftarrow \Phi(x)$ 
9:    $\text{err} \leftarrow |\text{fx} - x|$ 
10: Fin Tantque
11: Si  $\text{err} \leq \text{tol}$  alors
12:    $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow x$ 
13: Fin Si
14: Fin Fonction
    
```

▷ ou $\frac{|\text{fx} - x|}{|x| + 1}$

▷ ou $\frac{|\text{fx} - x|}{|x| + 1}$

▷ Convergence

Algorithm Méthode de Newton scalaire

Données :

f : $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$,
 df : la dérivée de f ,
 x_0 : donnée initiale, $x_0 \in \mathbb{R}$,
 tol : la tolérance, $\text{tol} \in \mathbb{R}^+$,
 kmax : nombre maximum d'itérations, $\text{kmax} \in \mathbb{N}^*$

Résultat :

α_{tol} : un réel tel que

```

1: Fonction  $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow \text{Newton}(f, \text{df}, x_0, \text{tol}, \text{kmax})$ 
2:  $\Phi \leftarrow (x \mapsto x - f(x)/\text{df}(x))$ 
3:  $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow \text{PtFixe}(\Phi, x_0, \text{tol}, \text{kmax})$ 
4: Fin Fonction
    
```

Rappel : Point fixe scalaire. Et le cas vectoriel ... ???

Méthode de point fixe scalaire

Données :

Φ : $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$,
 x_0 : donnée initiale, $x_0 \in \mathbb{R}$,
 tol : la tolérance, $\text{tol} \in \mathbb{R}^+$,
 kmax : nombre maximum d'itérations, $\text{kmax} \in \mathbb{N}^*$

Résultat :

α_{tol} : un réel tel que $|\Phi(\alpha_{\text{tol}}) - \alpha_{\text{tol}}| \leq \text{tol}$
 (ou $\frac{|\Phi(\alpha_{\text{tol}}) - \alpha_{\text{tol}}|}{|\alpha_{\text{tol}}| + 1} \leq \text{tol}$)

```

1: Fonction  $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow \text{PtFixe}(\Phi, x_0, \text{tol}, \text{kmax})$ 
2:  $k \leftarrow 0, \alpha_{\text{tol}} \leftarrow \emptyset$ 
3:  $x \leftarrow x_0, \text{fx} \leftarrow \Phi(x_0)$ ,
4:  $\text{err} \leftarrow |\text{fx} - x|$ 
5: Tantque  $\text{err} > \text{tol}$  et  $k \leq \text{kmax}$  faire
6:    $k \leftarrow k + 1$ 
7:    $x \leftarrow \text{fx}$ 
8:    $\text{fx} \leftarrow \Phi(x)$ 
9:    $\text{err} \leftarrow |\text{fx} - x|$ 
10: Fin Tantque
11: Si  $\text{err} \leq \text{tol}$  alors
12:    $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow x$ 
13: Fin Si
14: Fin Fonction
    
```

▷ ou $\frac{|\text{fx} - x|}{|x| + 1}$

▷ ou $\frac{|\text{fx} - x|}{|x| + 1}$

▷ Convergence

Méthode de point fixe vectorielle

Données :

Φ : $\mathbb{K}^N \rightarrow \mathbb{K}^N$,
 \mathbf{x}_0 : donnée initiale, $\mathbf{x}_0 \in \mathbb{K}^N$,
 tol : la tolérance, $\text{tol} \in \mathbb{R}^+$,
 kmax : nombre maximum d'itérations, $\text{kmax} \in \mathbb{N}^*$

Résultat :

α_{tol} : un réel tel que $\|\Phi(\alpha_{\text{tol}}) - \alpha_{\text{tol}}\| \leq \text{tol}$

```

1: Fonction  $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow \text{PtFixeVec}(\Phi, \mathbf{x}_0, \text{tol}, \text{kmax})$ 
2:  $k \leftarrow 0, \alpha_{\text{tol}} \leftarrow \emptyset$ 
3:  $\mathbf{x} \leftarrow \mathbf{x}_0, \text{fx} \leftarrow \Phi(\mathbf{x}_0)$ ,
4:  $\text{err} \leftarrow \|\text{fx} - \mathbf{x}\|$ 
5: Tantque  $\text{err} > \text{tol}$  et  $k \leq \text{kmax}$  faire
6:    $k \leftarrow k + 1$ 
7:    $\mathbf{x} \leftarrow \text{fx}$ 
8:    $\text{fx} \leftarrow \Phi(\mathbf{x})$ 
9:    $\text{err} \leftarrow \|\text{fx} - \mathbf{x}\|$ 
10: Fin Tantque
11: Si  $\text{err} \leq \text{tol}$  alors
12:    $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow \mathbf{x}$ 
13: Fin Si
14: Fin Fonction
    
```

Rappel : Point fixe scalaire. Et le cas vectoriel ... ???

Méthode de point fixe vectorielle

Données :

Φ : $\mathbb{K}^N \rightarrow \mathbb{K}^N$,
 \mathbf{x}_0 : donnée initiale, $\mathbf{x}_0 \in \mathbb{K}^N$,
 tol : la tolérance, $\text{tol} \in \mathbb{R}^+$,
 kmax : nombre maximum d'itérations, $\text{kmax} \in \mathbb{N}^*$

Résultat :

α_{tol} : un réel tel que $\|\Phi(\alpha_{\text{tol}}) - \alpha_{\text{tol}}\| \leq \text{tol}$

```

1: Fonction  $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow \text{PtFixeVec}(\Phi, \mathbf{x}_0, \text{tol}, \text{kmax})$ 
2:  $k \leftarrow 0, \alpha_{\text{tol}} \leftarrow \emptyset$ 
3:  $\mathbf{x} \leftarrow \mathbf{x}_0, \text{fx} \leftarrow \Phi(\mathbf{x}_0)$ ,
4:  $\text{err} \leftarrow \|\text{fx} - \mathbf{x}\|$ 
5: Tantque  $\text{err} > \text{tol}$  et  $k \leq \text{kmax}$  faire
6:    $k \leftarrow k + 1$ 
7:    $\mathbf{x} \leftarrow \text{fx}$ 
8:    $\text{fx} \leftarrow \Phi(\mathbf{x})$ 
9:    $\text{err} \leftarrow \|\text{fx} - \mathbf{x}\|$ 
10: Fin Tantque
11: Si  $\text{err} \leq \text{tol}$  alors
12:    $\alpha_{\text{tol}} \leftarrow \mathbf{x}$ 
13: Fin Si
14: Fin Fonction
    
```

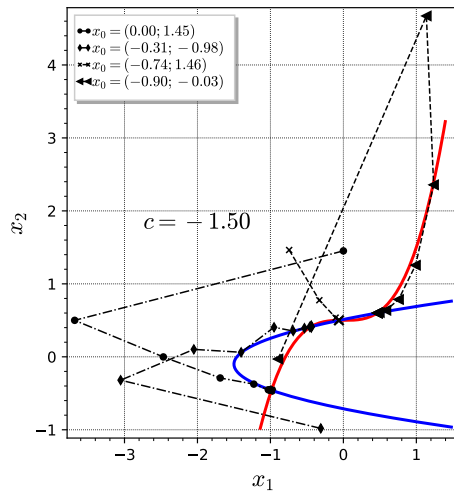
Plan

- 1 Recherche des zéros d'une fonction
 - Méthode de dichotomie ou de bisection
 - Points fixes d'une fonction (dimension 1)
 - Points fixes attractifs et répulsifs
 - Algorithme générique du point fixe
 - Points fixes pour la recherche de racines
- 2 Résolution de systèmes non linéaires
 - Point fixe
 - Méthode de Newton
 - Exemples

Représentation de 4 suites de Newton avec $c = -3/2$

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2) = -x_1^3 + x_2 - \frac{1}{2} = 0 \\ f_2(x_1, x_2) = \frac{1}{25}(10x_2 + 1)^2 + c - x_1 = 0. \end{cases}$$

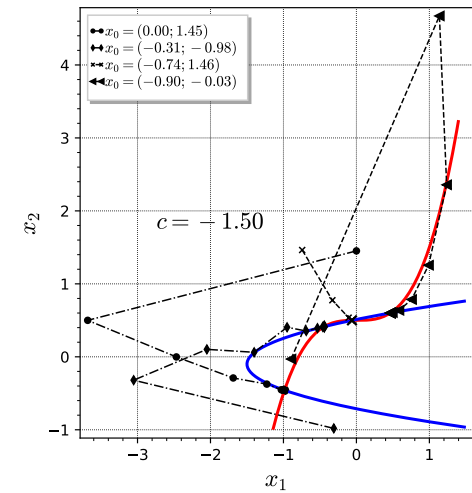
Conclusion?



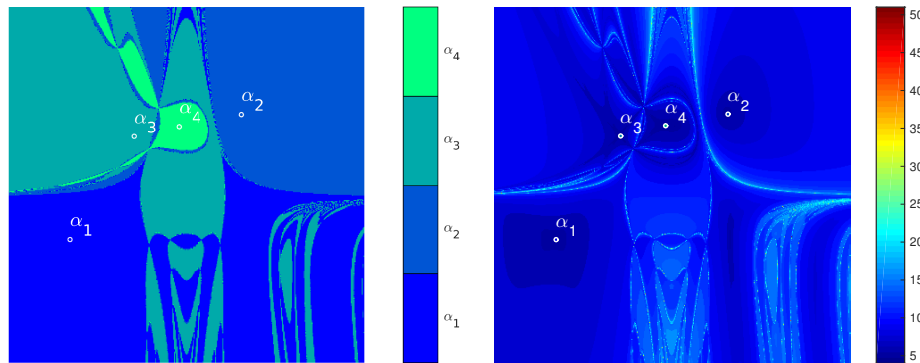
Représentation de 4 suites de Newton avec $c = -3/2$

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2) = -x_1^3 + x_2 - \frac{1}{2} = 0 \\ f_2(x_1, x_2) = \frac{1}{25}(10x_2 + 1)^2 + c - x_1 = 0. \end{cases}$$

Conclusion?



Très difficile, si l'on n'est pas suffisamment proche d'un point fixe, de prédire vers lequel on converge.



(a) Bassin d'attraction des racines

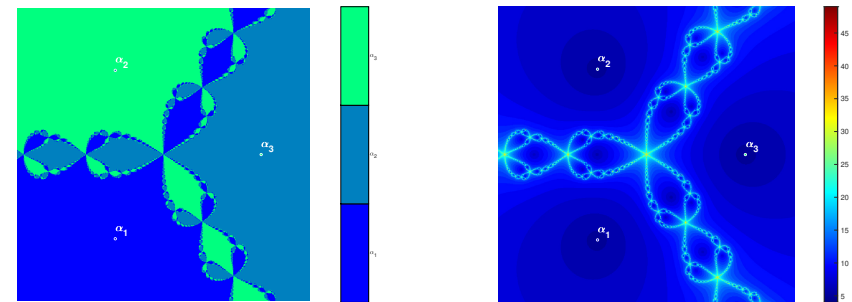
(b) Nombre d'itérations de convergence

Figure: Méthode de Newton

Exemple complexe : $z^3 - 1 = 0$, fractale de Newton

on peut poser $z = x + iy$, et le système équivalent devient

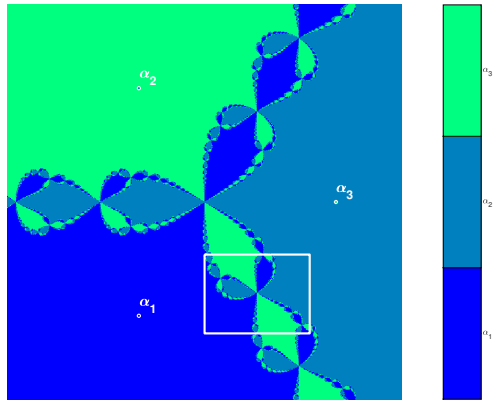
$$\begin{cases} f_1(x, y) = x^3 - 3xy^2 - 1 = 0 \\ f_2(x, y) = 3x^2y - x^3 = 0. \end{cases}$$



(a) Bassin d'attraction des racines

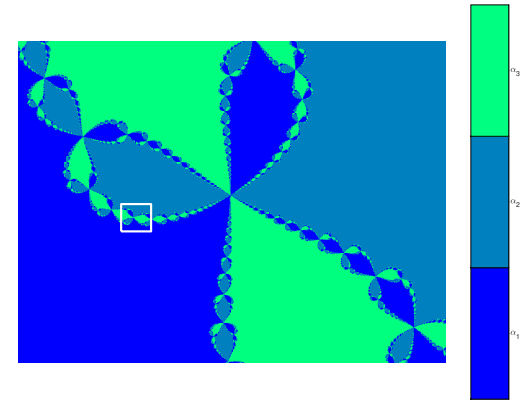
(b) Nombre d'itérations de convergence

Exemple complexe : $z^3 - 1 = 0$, fractale de Newton



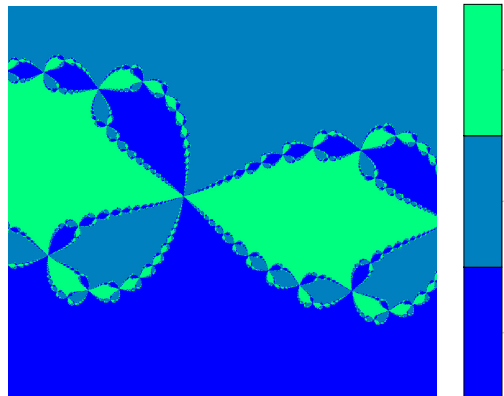
Méthode de Newton, zoom 1 sur les bassins d'attraction

Exemple complexe : $z^3 - 1 = 0$, fractale de Newton



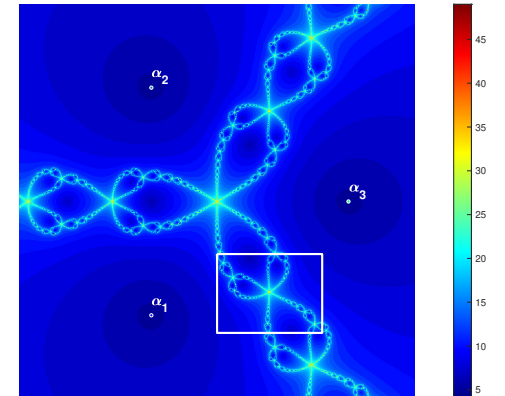
Méthode de Newton, zoom 2 sur les bassins d'attraction

Exemple complexe : $z^3 - 1 = 0$, fractale de Newton



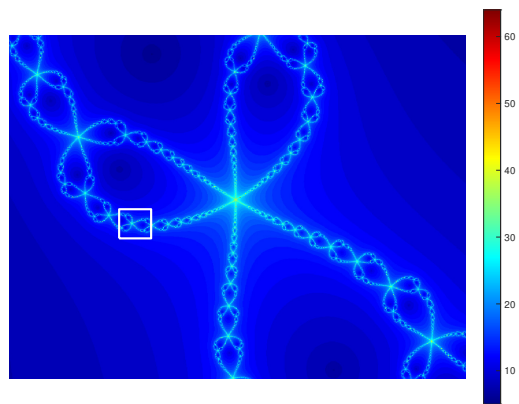
Méthode de Newton, zoom 3 sur les bassins d'attraction

Exemple complexe : $z^3 - 1 = 0$, fractale de Newton



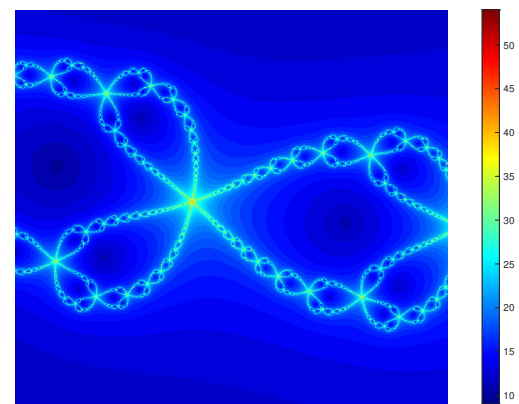
Méthode de Newton, zoom 1 sur les nombres d'itérations

Exemple complexe : $z^3 - 1 = 0$, fractale de Newton



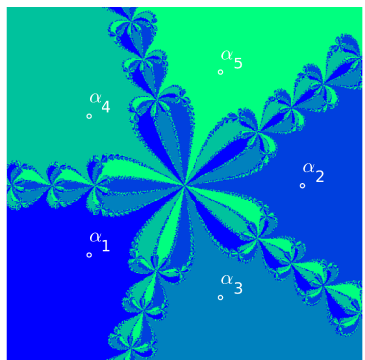
Méthode de Newton, zoom 2 sur les nombres d'itérations

Exemple complexe : $z^3 - 1 = 0$, fractale de Newton

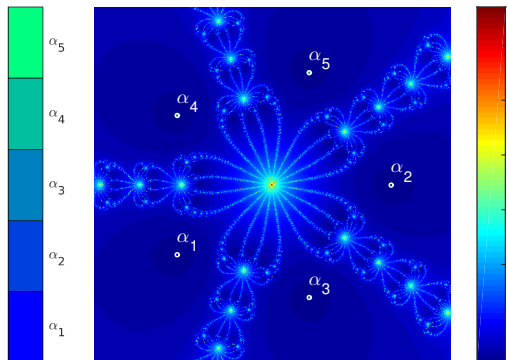


Méthode de Newton, zoom 3 sur les nombres d'itérations

Exemple complexe : $z^5 - 1 = 0$, fractale de Newton



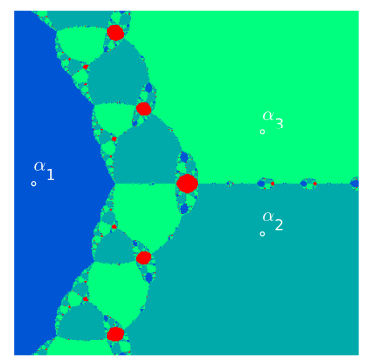
(a) Bassin d'attraction des racines



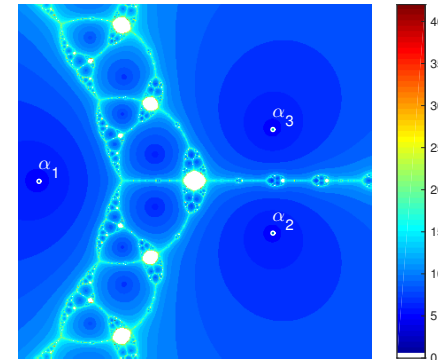
(b) Nombre d'itérations de convergence

$[-1.5, 1.5] \times [-1.5, 1.5]$

Exemple complexe : $z^3 - 2z + 2 = 0$, fractale de Newton



(a) Bassin d'attraction des racines. En rouge zone de divergence



(b) Nombre d'itérations de convergence. En blanc zone de divergence

$[-2, 2] \times [-2, 2]$