

ECN 6338 Cours 5

Résolution de systèmes d'équations non-linéaires

William McCausland

2025-10-03

Survol du cours 5

Le problème de la résolution de systèmes non-linéaires

1. Description des problèmes univariés et multivariés
2. Exemples illustratifs
3. Exemple économique : jeu du duopole

Méthodes pour problèmes univariés

1. Méthode de dichotomie (sans dérivées)
2. Méthodes de type Dekker-Brent (sans dérivées)
3. Newton (dérivées)
4. Interpolation linéaire (approximation des dérivées)

Méthodes pour problèmes multivariés

1. Gauss-Seidel
2. Newton
3. Broyden

Systèmes d'équations en économie

Équations en économie

1. Contraintes

- ▶ de ressources physiques, de technologies, de temps
- ▶ de budget, de participation, d'incitation

2. Autres conditions de premier ordre pour l'optimisation

- ▶ consommateurs, firmes, joueurs
- ▶ économètres

3. Conditions d'équilibre

- ▶ offre et demande
- ▶ équilibres de Nash

Les problèmes univariés et multivariés

- Problème univarié : trouvez $x \in \mathbb{R}$ qui vérifie

$$f(x) = 0,$$

où $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. En d'autres termes, trouver une racine de $f(x)$.

- Problème multivarié : trouvez $x \in \mathbb{R}^n$ qui vérifie

$$f(x) = 0_n,$$

où $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$.

- Problème multivarié, écrit élément par élément : trouvez (x_1, \dots, x_n) qui vérifie

$$f^1(x_1, \dots, x_n) = 0$$

$$\vdots$$

$$f^n(x_1, \dots, x_n) = 0$$

La résolution de systèmes d'équations et l'optimisation

Une solution x^* au problème d'optimisation libre

$$\max_{x \in \mathbb{R}^n} f(x),$$

où $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ et $f \in C^2$, est aussi une solution du système

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x^\top} = 0_n.$$

Toutefois, la résolution du système $g(x) = 0$, où $g \in C^1$, est plus générale, car :

- ▶ la matrice jacobienne de g n'est pas forcément symétrique,
- ▶ tandis que la matrice jacobienne de $\frac{\partial f(x)}{\partial x^\top}$ correspond à la matrice hessienne symétrique de f .

Aussi, l'ordre des éléments de g est arbitraire en général.

Systèmes non-linéaires et le nombre de solutions

Dans le cas spécial $f(x) = Ax - b = 0$, où A est une matrice $n \times n$,

- ▶ si le rang de A est de n , il y a une solution unique ;
- ▶ si le rang de A est inférieur à n , alors il n'existe pas de solution :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix},$$

ou il y a un nombre infini de solutions :

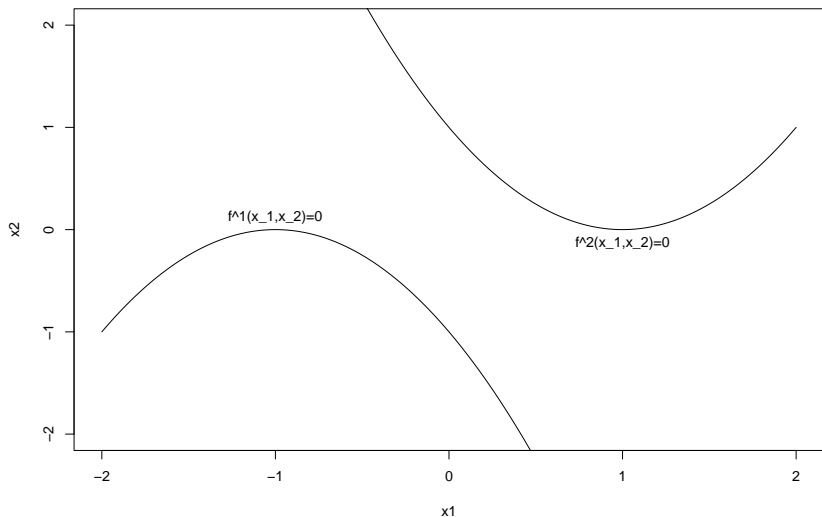
$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \end{bmatrix}.$$

Dans le cas général, il peut y avoir

- ▶ aucune solution, même pour les fonctions f^i très différentes,
- ▶ un nombre fini quelconque de solutions,
- ▶ un nombre infini de solutions.

Exemple : absence d'une solution

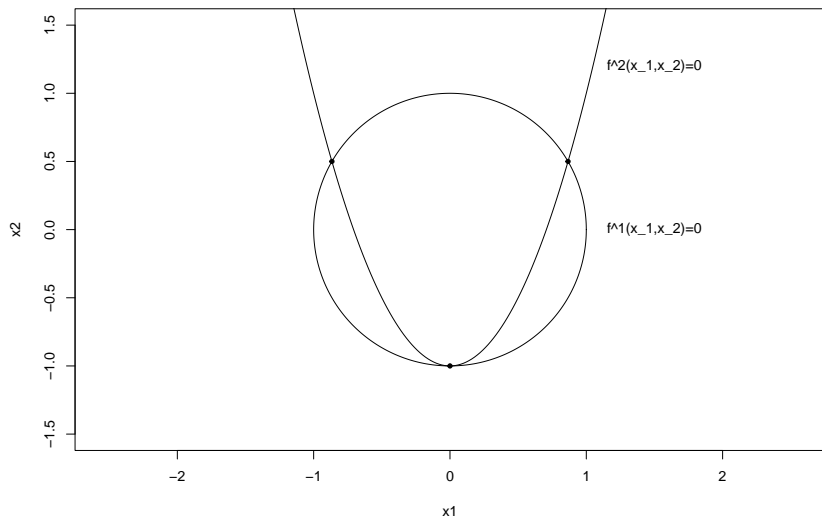
$$f^1(x_1, x_2) = x_2 - (x_1 + 1)^2, \quad f^2(x_1, x_2) = x_2 - (x_1 - 1)^2.$$



Exemple : solutions multiples

Les racines de ce système sont $(0, -1)$, $(\pm\sqrt{3/4}, 1/2)$:

$$f^1(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2 - 1, \quad f^2(x_1, x_2) = 2x_1^2 - x_2 - 1.$$



Jeu du duopole (Judd, pages 162-3)

- ▶ Dans un duopole, la firme 1 produit un bien en quantité Y , et la firme 2 produit un bien en quantité Z .
- ▶ Les coûts de production sont linéaires

$$c_Y(Y) = C_Y Y, \quad c_Z(Z) = C_Z Z,$$

où $C_Y = 0.07$ et $C_Z = 0.08$.

- ▶ La demande provient d'un consommateur dont la fonction d'utilité est

$$U(Y, Z) = u(Y, Z) + M = (1 + Y^\alpha + Z^\alpha)^{\eta/\alpha} + M,$$

où $\alpha = 0.999$, $\eta = 0.2$ et M représente les dépenses pour d'autres biens.

- ▶ La demande pour Y et Z est donnée par les équations

$$p_Y = u_Y(Y, Z), \quad p_Z = u_Z(Y, Z),$$

où p_Y et p_Z sont les prix de Y et Z .

Jeu du duopole (suite)

- ▶ On cherche un équilibre de Nash (Y^*, Z^*) où
 - ▶ Y^* maximise le profit de la firme 1, pour Z^* donnée,
 - ▶ Z^* maximise le profit de la firme 2, pour Y^* donnée.
- ▶ Le profit de la firme 1 (producteur de Y) est :

$$\begin{aligned}\Pi^Y(Y, Z) &= Y u_Y(Y, Z) - C_Y Y \\ &= \eta(1 + Y^\alpha + Z^\alpha)^{(\eta/\alpha)-1} Y^\alpha - C_Y Y \\ &= \eta(1 + e^{\alpha y} + e^{\alpha z})^{(\eta/\alpha)-1} e^{\alpha y} - C_Y e^y,\end{aligned}$$

où $y = \log Y$, $z = \log Z$.

- ▶ Une condition de premier ordre nécessaire pour un maximum :

$$\begin{aligned}\Pi_1^Y(Y, Z) &= \alpha \eta \left(\frac{\eta}{\alpha} - 1\right) (1 + e^{\alpha y} + e^{\alpha z})^{(\eta/\alpha)-2} e^{2\alpha y} \\ &\quad + \alpha \eta (1 + e^{\alpha y} + e^{\alpha z})^{(\eta/\alpha)-1} e^{\alpha y} - C_Y e^y = 0.\end{aligned}$$

- ▶ La même démarche pour la firme 2 donne une expression analogue $\Pi_2^Z(Y, Z) = 0$.

Le problème de calcul pour le jeu du duopole

Chaque firme choisit sa quantité en fonction de celle de l'autre.
L'équilibre (à la Cournot) du jeu du duopole est la paire

$$(Y^*, Z^*) = (e^{Y^*}, e^{Z^*}) \equiv (e^{x_1^*}, e^{x_2^*}),$$

où aucune n'a intérêt à dévier : $x^* = (x_1^*, x_2^*)$ est la solution du système $f(x) = 0$, où

$$f^1(x_1, x_2) = \Pi_1^Y(e^{x_1}, e^{x_2}), \quad f^2(x_1, x_2) = \Pi_2^Z(e^{x_1}, e^{x_2}).$$

Illustration univariée I : méthode de Newton

Considérons la fonction f et sa dérivée, définie sur l'intervalle $[0, 1]$:

$$f(x) = (1 - x)^3 - \log(1 + x), \quad f'(x) = -3(1 - x)^2 - (1 + x)^{-1}.$$

Si on prend le point initial $x_0 = 0$, la droite de tangente est

$$g(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) = f(0) + f'(0)(x - 0) = 1 - 4x,$$

et le point x_1 de l'itération de Newton est l'intersection de cette droite et l'axe des abscisses :

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} = 0 - \frac{f(0)}{f'(0)} = -\frac{1}{-3 - 1} = \frac{1}{4}.$$

Un pas de Newton de plus donne (points x_1 et x_2 en rouge)

$$x_2 = x_1 - \frac{f(1/4)}{f'(1/4)} \approx 0.329892,$$

très près de la racine unique.

Illustration univariée II : échec de la méthode de Newton

- ▶ On peut commencer à $x_0 = 1$ plus loin de la racine et où la pente est moins raide.
- ▶ On évalue $f(x_0) = -\log 2$, $f'(x_0) = -\frac{1}{2}$ et on calcule

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \approx -0.3862944,$$

beaucoup plus loin de la racine et hors de l'intervalle $[0, 1]$.

- ▶ À voir aussi : “Pathological Examples”, page 153 de Judd.

Illustration univariée III : méthode d'interpolation linéaire

- ▶ Note : fonction $f(x)$ en bleu, droites de tangente en rouge, droite de sécante en vert.
- ▶ Pour la première itération, où on calcule x_1 , on n'a pas encore deux valeurs précédentes et on utilise la méthode de Newton.
- ▶ Une fois qu'on a x_0 et x_1 , on peut construire la droite de sécante entre $(x_0, f(x_0))$ et $(x_1, f(x_1))$:

$$h(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}(x - x_0)$$

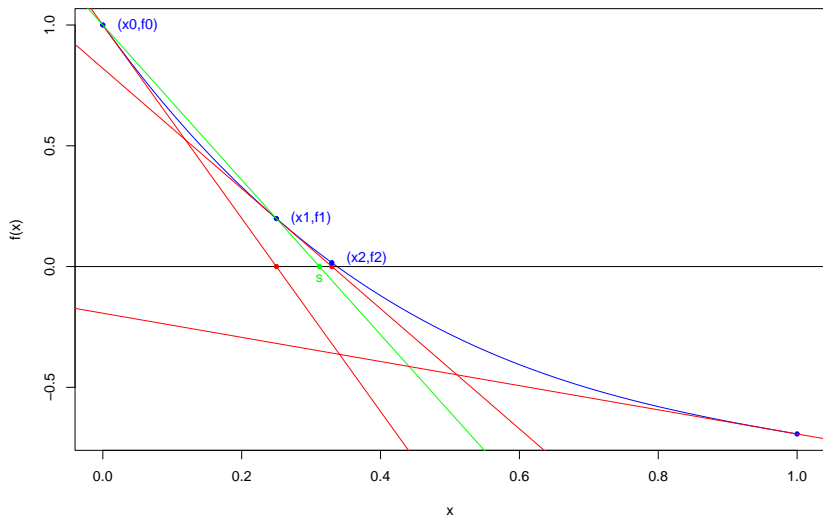
- ▶ Le point s de l'itération par interpolation linéaire est l'intersection de cette droite et l'axe des abscisses :

$$s = x_0 + \frac{(x_1 - x_0)}{f(x_1) - f(x_0)} f(x_0) \approx 0.3120053,$$

un peu plus loin de la racine que x_2 (Newton, 2ième itération), mais trouvé sans évaluation de la dérivée $f'(x_0)$.

Illustration (Newton et interpolation linéaire)

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



Méthode de dichotomie

Intrants à l'itération $k + 1$: points a_k , b_k , valeurs $f(a_k)$, $f(b_k)$ tels que

1. $a_k < b_k$,
2. $f(a_k)f(b_k) < 0$. (signes opposés)

À l'itération $k + 1$:

1. Calculer $m = \frac{1}{2}(a_k + b_k)$.
2. Évaluer $f(m)$, si $f(m) = 0$, terminer avec la racine m .
3. Si $f(m)$ a le même signe que $f(a_k)$,

$$a_{k+1} = m, \quad b_{k+1} = b_k.$$

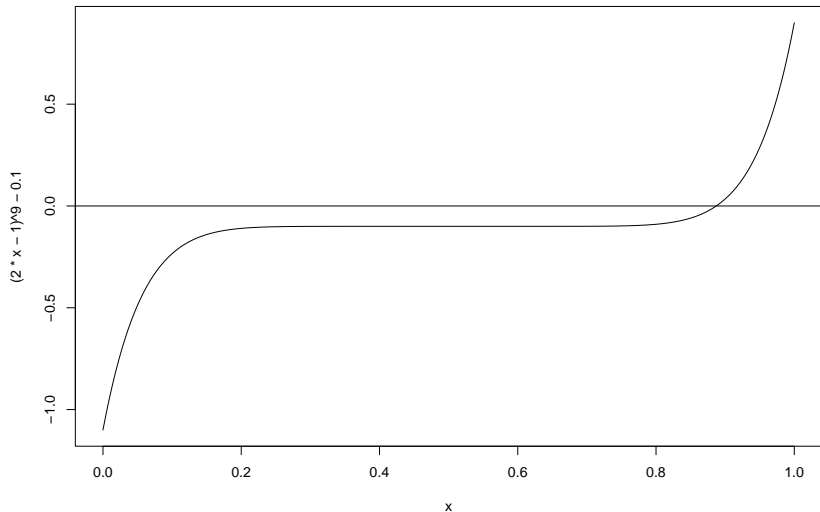
sinon

$$a_{k+1} = a_k \quad b_{k+1} = m.$$

Si $b_{k+1} - a_{k+1} < \delta$, terminer avec $\frac{1}{2}(a_{k+1} + b_{k+1})$.

Quand la méthode de dichotomie marche relativement bien

```
x = seq(0, 1, by=0.0001)
plot(x, (2*x-1)^9 - 0.1, type='l')
abline(h=0)
```



Discussion, méthode de dichotomie

- ▶ On évalue seulement la fonction et non la dérivée.
- ▶ Pour garantir la convergence, la fonction doit être continue, mais pas forcément différentiable.
- ▶ On gagne 1 bit de précision à chaque itération (pas beaucoup, mais sûr),
- ▶ On sait à l'avance combien d'itérations il faut pour atteindre ces deux conditions : $b_k - a_k < \delta$, $[a_k, b_k]$ contient une racine.
- ▶ Mais la méthode de dichotomie est très sous-optimale pour les fonctions rencontrées en pratique, même parmi les méthodes qui évaluent la fonction seulement.
- ▶ On veut accélérer la convergence et en même temps garantir un intervalle court en un nombre borné d'itérations.

Un jeu zéro-somme

- ▶ Considérez le jeu zéro-somme entre
 - ▶ joueur 1, qui choisit une fonction continue $f(x)$ avec $f(a_0)f(b_0) < 0$, et veut maximiser le nombre d'itérations pour trouver un intervalle $[a, a + \delta]$ qui contient une racine ; et
 - ▶ joueur 2, qui choisit un algorithme pour trouver un intervalle $[a, a + \delta]$ contenant une racine, et veut minimiser le nombre d'itérations ;
 - ▶ où joueur 2 joue en premier.
- ▶ Conjecture : La méthode de dichotomie est optimale (minmax) pour le joueur 2.

Méthodes du type Dekker-Brent

Intrants à l'itération $k + 1$: points a_k , b_k , b_{k-1} ($b_{-1} = a_0$) et valeurs $f(a_k)$, $f(b_k)$ et $f(b_{k-1})$ tels que

1. $|f(a_k)| \geq |f(b_k)|$ (point b_k , contrepont a_k)
2. $f(a_k)f(b_k) < 0$.

À l'itération $k + 1$:

1. Calculer une proposition prometteuse s pour b_{k+1} comme fonction de a_k , b_k , $f(a_k)$, $f(b_k)$, b_{k-1} , $f(b_{k-1})$. (deux façons, détails à venir)
2. Calculer une proposition de repli $m = \frac{1}{2}(a_k + b_k)$.
3. Choisir entre $b_{k+1} = s$ et $b_{k+1} = m$. (détails à venir)
4. Évaluer $f(b_{k+1})$, si $f(b_{k+1}) = 0$, terminer avec b_{k+1} .
5. Choisir entre $a_{k+1} = a_k$ et $a_{k+1} = b_k$ tel que $f(a_{k+1})f(b_{k+1}) < 0$. (Condition 2.)
6. Si $|f(a_{k+1})| < |f(b_{k+1})|$, échanger a_{k+1} , b_{k+1} . (Condition 1.)
7. Si $|a_{k+1} - b_{k+1}| < \delta$, terminer avec b_{k+1} .

Une itération de Dekker-Brent

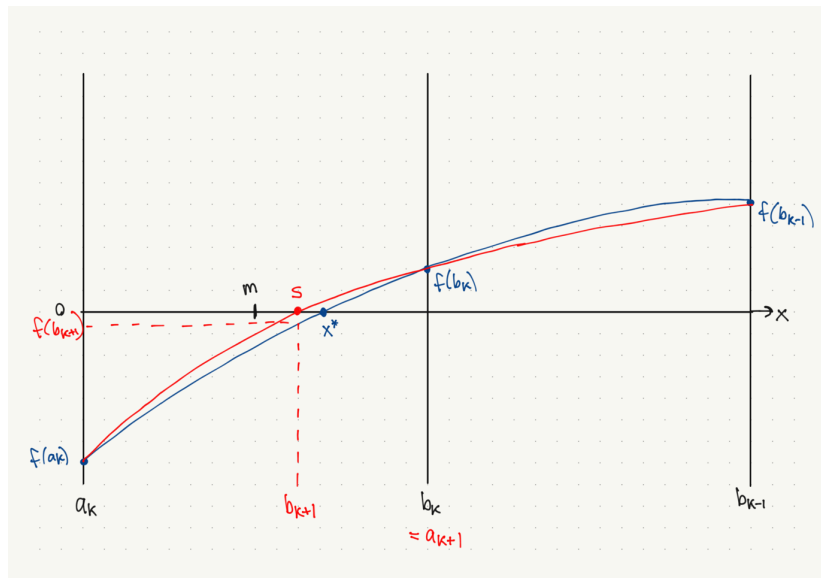


Figure 1: De (a_k, b_k, b_{k-1}) à (a_{k+1}, b_{k+1}, b_k)

Calculer s (étape 2) par interpolation linéaire (droite sécante)

$$s = b_k - \frac{b_k - b_{k-1}}{f(b_k) - f(b_{k-1})} f(b_k)$$

Notes :

1. Si $b_{k-1} = a_k$, l'interpolation linéaire est obligatoire.
2. s n'est pas une fonction de a_k .
3. Si on choisit s par interpolation linéaire, une condition nécessaire pour choisir $b_{k+1} = s$ (étape 3) est que s se trouve entre m et b_k .

Calculer s (étape 2) par interpolation inverse quadratique

- ▶ Supposez que $f(a_k)$, $f(b_k)$ et $f(b_{k-1})$ sont distinctes.
- ▶ Voici une fonction quadratique $g(y)$ qui passe par les points $(f(a_k), a_k)$, $(f(b_k), b_k)$ et $(f(b_{k-1}), b_{k-1})$:

$$\begin{aligned} g(y) = & \frac{(y - f(a_k))(y - f(b_k))}{(f(b_{k-1}) - f(a_k))(f(b_{k-1}) - f(b_k))} b_{k-1} \\ & + \frac{(y - f(a_k))(y - f(b_{k-1}))}{(f(b_k) - f(a_k))(f(b_k) - f(b_{k-1}))} b_k \\ & + \frac{(y - f(b_{k-1}))(y - f(b_k))}{(f(a_k) - f(b_{k-1}))(f(a_k) - f(b_k))} a_k \end{aligned}$$

- ▶ La fonction inverse $x = f^{-1}(y)$ passe par les mêmes points.
- ▶ On définit $s \equiv g(0)$, qui est un zéro de la fonction $g^{-1}(x)$

Calculer s par interpolation inverse quadratique (suite)

$$\begin{aligned}s = & \frac{f(a_k)f(b_k)}{(f(b_{k-1}) - f(a_k))(f(b_{k-1}) - f(b_k))}b_{k-1} \\ & + \frac{f(a_k)f(b_{k-1})}{(f(b_k) - f(a_k))(f(b_k) - f(b_{k-1}))}b_k \\ & + \frac{f(b_{k-1})f(b_k)}{(f(a_k) - f(b_{k-1}))(f(a_k) - f(b_k))}a_k\end{aligned}$$

Notes :

1. Habituellement, c'est une amélioration, mais on peut toujours utiliser l'interpolation linéaire quand $k = 1$ où quand deux des valeurs $f(a_k)$, $f(b_k)$ et $f(b_{k-1})$ sont très près l'une à l'autre.
2. Si on choisit s par interpolation inverse quadratique, une condition nécessaire habituelle pour choisir $b_{k+1} = s$ (étape 3) est que s se trouve entre $\frac{3}{4}b_k + \frac{1}{4}a_k$ et b_k .

Choisir entre s et m (étape 3)

- ▶ $b_{k+1} = m$ est plus sûr que $b_{k+1} = s$, mais le deuxième est habituellement meilleur.
- ▶ On ajoute aux conditions nécessaires déjà mentionnées pour choisir s d'autres conditions :
 - ▶ Après un pas de bisection (pour b_k), on ajoute les conditions $|b_k - b_{k-1}| > \delta$ et $\frac{1}{2}|b_k - b_{k-1}| > |s - b_k|$.
 - ▶ Après un pas d'interpolation, on ajoute les conditions $|b_{k-1} - b_{k-2}| > \delta$ et $\frac{1}{2}|b_{k-1} - b_{k-2}| > |s - b_k|$.
- ▶ Avec ces conditions, le nombre maximal d'itérations est de M^2 , où M est le nombre d'itérations nécessaires pour la méthode de dichotomie.

Méthode de Gauss-Seidel (exemple)

- Rappelons l'exemple avec trois racines :

$$f^1(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2 - 1, \quad f^2(x_1, x_2) = 2x_1^2 - x_2 - 1.$$

- Résoudre $f^i(x_1, x_2) = 0$ pour x_i , $i = 1, 2$, donne une mise à jour possible de Seidel :

$$x_1^{k+1} = \pm \sqrt{1 - (x_2^k)^2}, \quad x_2^{k+1} = 2(x_1^{k+1})^2 - 1$$

- La version linéaire (méthode de Newton) de Seidel donne

$$x_1^{k+1} = x_1^k - \frac{f^1(x_1^k, x_2^k)}{f_1^1(x_1^k, x_2^k)} = x_1^k - \frac{(x_1^k)^2 + (x_2^k)^2 - 1}{2x_1^k},$$

et $x_2^{k+1} = 2(x_1^{k+1})^2 - 1$ comme dans la version non-linéaire.

La Méthode de Gauss-Seidel avec une permutation

- ▶ L'ordre des variables et l'ordre des équations important.
- ▶ Résoudre $f^1(x_1, x_2) = 0$ pour x_2 et $f^2(x_1, x_2) = 0$ pour x_1 donne une autre mise à jour de Seidel :

$$x_1^{k+1} = \pm \sqrt{\frac{1}{2}(1 + x_2^k)}, \quad x_2^{k+1} = \pm \sqrt{1 - (x_1^k)^2}.$$

- ▶ Quatre versions : ++, +-, -+, --.
- ▶ Le choix de permutation et des signes peut faire la différence entre
 - ▶ convergence ou non,
 - ▶ convergence rapide ou lente,
 - ▶ racines différentes.

Illustration Gauss-Seidel

```
x0 = c(0.6, -0.6); name = 'seidel'  
source('../cerc_parab.R')
```

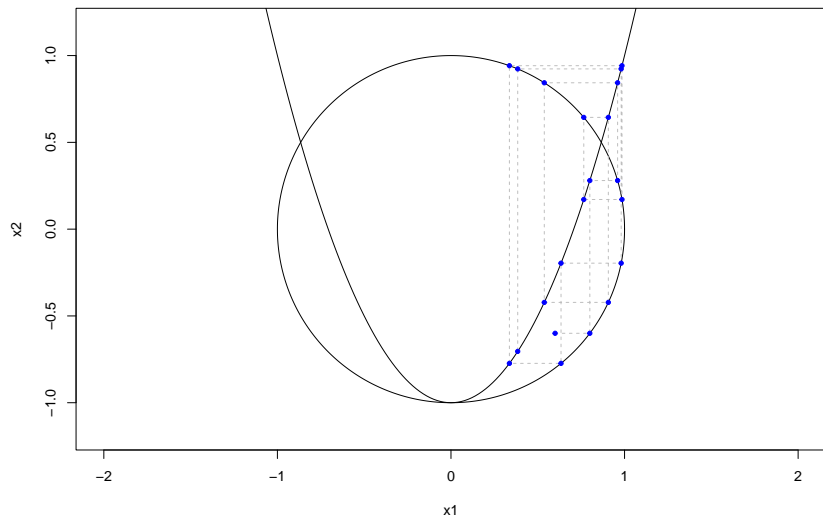


Illustration Gauss-Seidel linéaire

```
x0 = c(0.6, -0.6); name = 'seidel_lin'  
source('../cerc_parab.R')
```

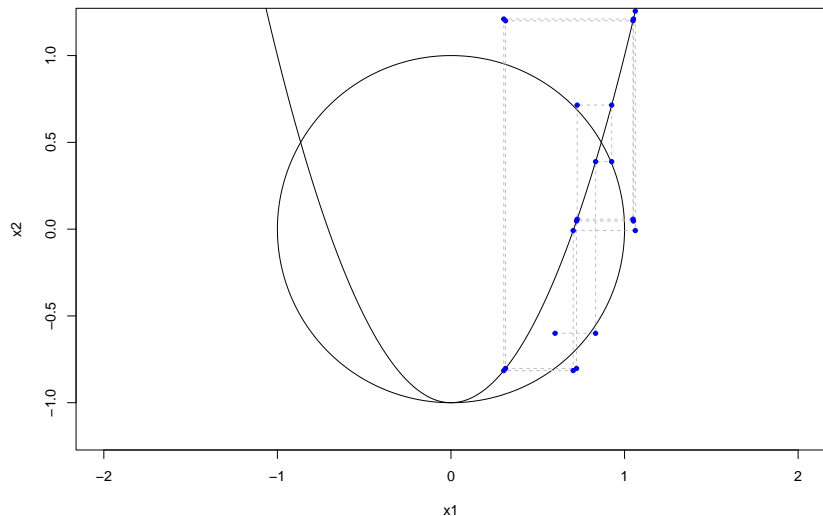


Illustration Gauss-Seidel (permutation, +, +)

```
x0 = c(0.6, -0.6); name = 'perm_seidel'  
source('../cerc_parab.R')
```

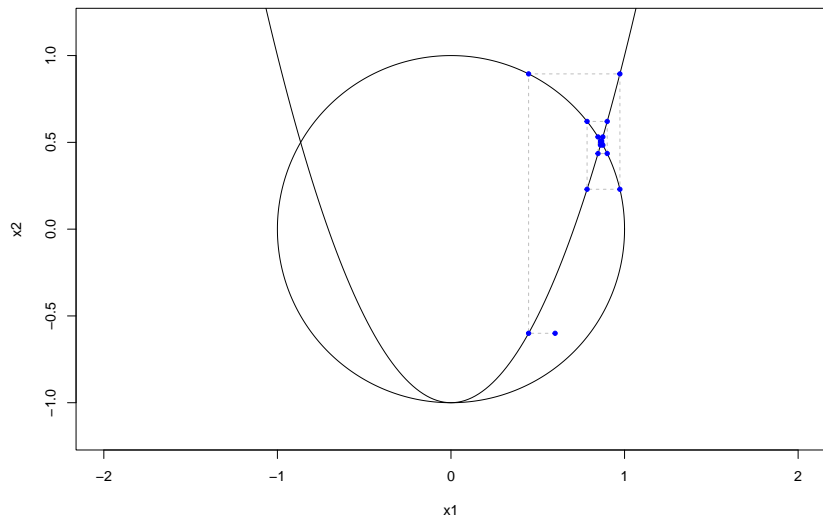


Illustration Gauss-Seidel (permutation, +, -)

```
x0 = c(0.6, -0.6); name = 'perm_seidel+-'  
source('../cerc_parab.R')
```

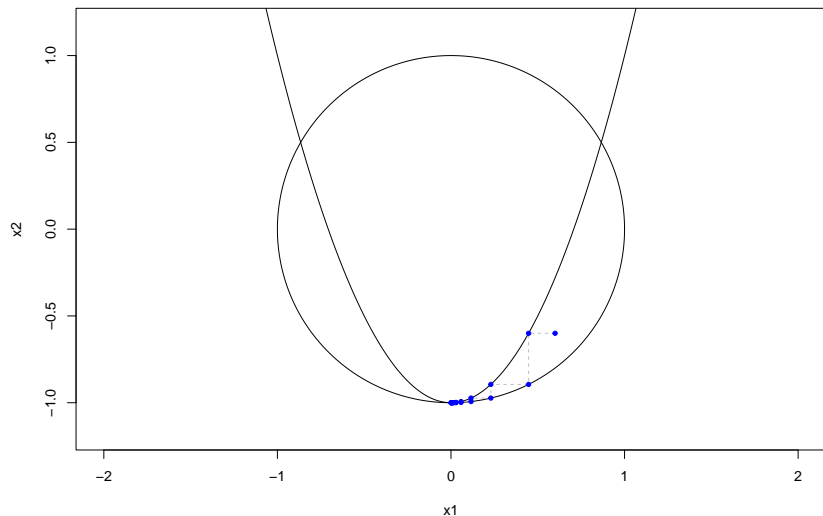


Illustration Gauss-Seidel (permutation, $-$, $+$)

```
x0 = c(0.6, -0.6); name = 'perm_seidel-+'
source(' ../cerc_parab.R')
```

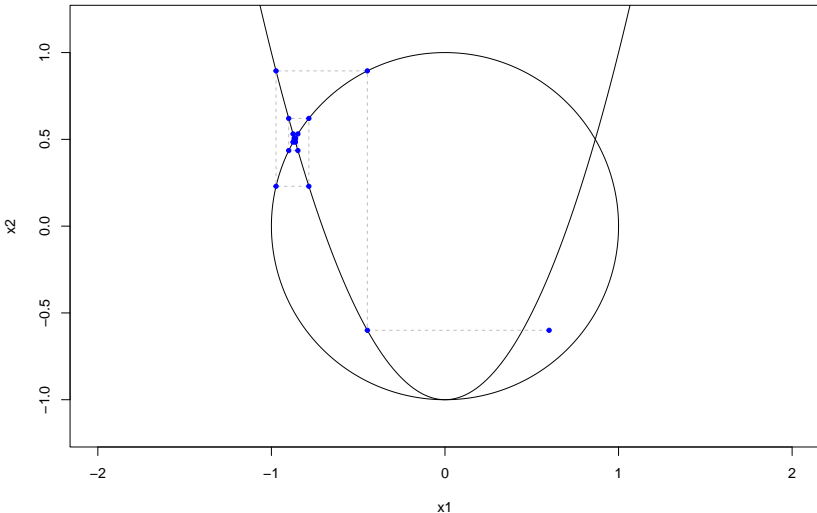
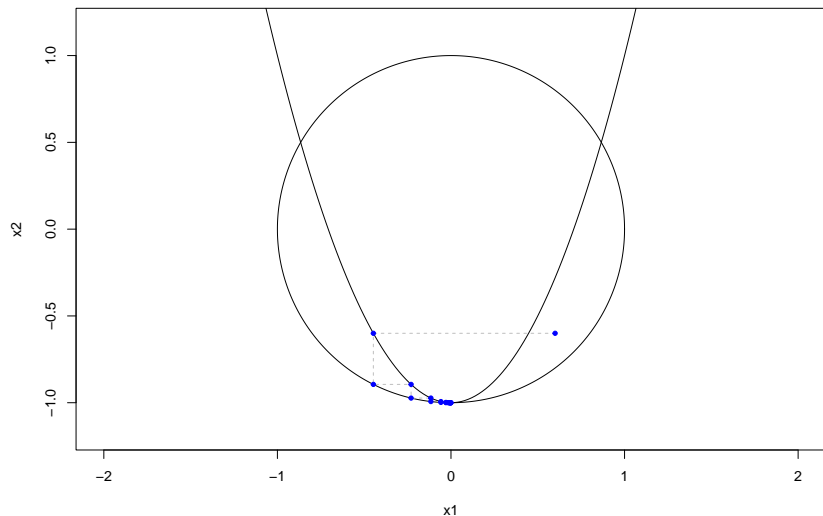


Illustration Gauss-Seidel (permutation, $-$, $-$)

```
x0 = c(0.6, -0.6); name = 'perm_seidel--'  
source('../cerc_parab.R')
```



Méthode de Newton

- L'expansion linéaire de Taylor autour du point actuel x^k est

$$g(x) = f(x^k) + J(x^k)(x - x^k).$$

- Si la matrice jacobienne est inversible, il y a un zéro de g à

$$\tilde{x}^* = x^k - J(x^k)^{-1}f(x^k).$$

- La mise à jour de Newton sans modification est $x^{k+1} = \tilde{x}^*$:

$$x^{k+1} = x^k - J(x^k)^{-1}f(x^k).$$

- La méthode converge rapidement (quadratiquement) d'un point local, mais elle n'est pas forcément globalement convergente.

Méthode de Broyden

- ▶ Comme la méthode BFGS (B pour Broyden) pour l'optimisation multivariée, la méthode de Broyden pour résoudre les systèmes non-linéaires multivariés utilise une approximation A_k de $J(x^k)$ pour donner un pas s^k :

$$s^k = -A_k^{-1}f(x^k), \quad x^{k+1} = x^k + s^k.$$

- ▶ La mise à jour de A_k est de rang 1 :

$$A_{k+1} = A_k + \frac{(y_k - A_k s^k)(s^k)^\top}{(s^k)^\top s^k} \quad \text{où} \quad y_k = f(x^{k+1}) - f(x^k).$$

- ▶ A_{k+1} vérifie une condition de corde dans la direction s^k :

$$A_{k+1}s^k = A_k s^k + (y_k - A_k s^k) = y_k = f(x^{k+1}) - f(x^k).$$

- ▶ A_{k+1} et A_k font la même chose dans les directions perpendiculaires à s_k : si un vecteur δ vérifie $s_k^\top \delta = 0$,

$$A_{k+1}\delta = A_k\delta.$$

Méthode de Broyden (suite)

La mise à jour $A_k \rightarrow A_{k+1}$ étant de rang 1 permet la mise à jour simultanée $A_k^{-1} \rightarrow A_{k+1}^{-1}$ en $O(n^2)$ opérations avec le formule Sherman-Morrison.

Illustration, méthodes de Newton et Broyden

- Code pour la fonction $f(x_1, x_2) = (x_1^2 + x_2^2 - 1, 2x_1^2 - x_2 - 1)$

```
library(pracma)
```

```
# La fonction
```

```
f <- function(x) {  
  f1 <- x[1]^2 + x[2]^2 - 1  
  f2 <- 2*x[1]^2 - x[2] - 1  
  c(f1, f2)  
}
```

```
# Sa matrice jacobienne
```

```
J <- function(x) {  
  J <- matrix(0, nrow=2, ncol=2)  
  J[1, 1] <- 2*x[1]; J[1, 2] <- 2*x[2];  
  J[2, 1] <- 4*x[1]; J[2, 2] <- -1;  
  J  
}
```

Illustration, méthode de Newton

```
x0 <- c(0.6, -0.6)
newtonsys(f, x0, Jfun=J)
```

```
## $zero
## [1] 7.573773e-09 -1.000000e+00
##
## $fnorm
## [1] 2.220446e-16
##
## $niter
## [1] 25
```

Illustration, méthode de Broyden

```
x0 <- c(0.6, -0.6)
broyden(f, x0, J0 = J(x0))

## $zero
## [1] 7.032333e-05 -1.000000e+00
##
## $fnorm
## [1] 1.043668e-08
##
## $niter
## [1] 20
```