

ECN 6338 Cours 12 et 13

La Programmation Dynamique

William McCausland

2022-04-07

Un problème d'optimisation dynamique déterministe à horizon fini

- ▶ Objectif :

$$\sum_{t=1}^T \pi(x_t, u_t, t) + W(x_{T+1}),$$

où

- ▶ t est l'index du temps,
 - ▶ x_t est l'état en période t , $t = 1, \dots, T + 1$,
 - ▶ u_t est la commande (une variable de choix, control en anglais),
 - ▶ $\pi(\cdot)$ est le flux de valeur (souvent profit où utilité),
 - ▶ $W(\cdot)$ est la valeur terminale.
- ▶ Contraintes :
 - ▶ x_1 donné,
 - ▶ $x_{t+1} = F(x_t, u_t, t)$, $t = 1, \dots, T$,
 - ▶ $u_t \in D(x_t, t)$, $t = 1, \dots, T$.

La version à horizon infini

- ▶ L'objectif devient

$$\sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \pi(x_t, u_t).$$

- ▶ le temps commence à zéro,
 - ▶ il n'y a pas de valeur terminale,
 - ▶ cas très spécial de $\pi(x_t, u_t, t)$: $\beta^t \pi(x_t, u_t)$.
- ▶ Quant aux contraintes :
 - ▶ $F(x_t, u_t)$ au lieu de $F(x_t, u_t, t)$ (pas vraiment une restriction)
 - ▶ $u_t \in D(x_t)$ au lieu de $D(x_t, t)$
 - ▶ x_0 donnée au lieu de x_1 .

Un exemple : accumulation de la richesse

- Le modèle :

$$\max_{c_t} \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t u(c_t) \quad \text{t.q.} \quad k_{t+1} = F(k_t) - c_t, \quad k_0 \text{ donné},$$

- Notes :

- L'état est le stock du capital : $x_t = k_t$
- La commande est la consommation : $u_t = c_t$
- F est une fonction de production d'un bien homogène (pas de distinction entre le capital et le seul bien de consommation).
- On peut inclure l'amortissement du capital dans F :
 $F(k) = f(k) - \delta k$, où $f(k)$ est la fonction de production grosse.
- Une interprétation du problème : celui du planificateur central dans un modèle simple de croissance néoclassique : il y a un équilibre concurrentiel qui donne la même résultat.

Autres exemples

- ▶ Problème d'un monopôle :
 - ▶ la commande est la quantité de travail l et le dividende c
 - ▶ l'état est la quantité de capital k dans la firme
 - ▶ l'état prochain est le profit (comme fonction de l et k) moins le dividende
 - ▶ le flux de valeur est le dividende versé dans une période
- ▶ Problème d'inventaire agricole (Judd, 428)
 - ▶ la commande est le choix d'intrants de production agricole
 - ▶ l'état est l'inventaire agricole
 - ▶ l'état prochain est la production moins la consommation
 - ▶ le flux de valeur est l'utilité de la consommation d'une période
- ▶ Problème de gestion d'un forêt
 - ▶ la commande est la quantité récoltée de chaque type (age) d'arbre,
 - ▶ l'état est la quantité de chaque type d'arbre,
 - ▶ l'état prochain est déterminé par la croissance des arbres et les quantités récoltées,
 - ▶ le flux de valeur est le profit apporté par la récolte d'une période

La fonction de valeur

La fonction de valeur est comme une fonction d'utilité indirecte :

- ▶ Soit $u(x, y)$ la fonction d'utilité pour deux biens, en quantités x et y .
- ▶ La contrainte budgétaire est $p_x x + p_y y = m$.
- ▶ La fonction d'utilité indirecte est

$$v(p_x, p_y, m) = \max_{x, y} u(x, y) \quad \text{t.q.} \quad p_x x + p_y y = m.$$

La fonction de valeur pour le problème à horizon fini est

$$V(x, t) = \sup_{u_t, \dots, u_T} \sum_{s=t}^T \pi(x_s, u_s, s) + W(x_{T+1}),$$

sous les contraintes

- ▶ $x_t = x$,
- ▶ $x_{s+1} = F(x_s, u_s, s)$, $s = t, \dots, T$,
- ▶ $u_s \in D(x_s, s)$, $s = t, \dots, T$.

Le principe d'optimalité de Bellman

Une commande optimale u_t, \dots, u_T a la propriété que quelque soit l'état initial x_t et la décision initiale u_t , les décisions restantes (u_{t+1}, \dots, u_T) doivent être une commande optimale pour l'état $x_{t+1} = F(x_t, u_t, t)$ résultant de la décision u_t .

Notes :

- Une relation entre fonctions de valeur de différentes périodes :

$$V(x, t) = \sup_{u \in D(x, t)} \pi(x, u, t) + V(F(x, u, t), t + 1).$$

- Si $u \in D(x, t)$ atteint le sup, la fonction de politique est

$$U(x, t) = \arg \max_{u \in D(x, t)} \pi(x, u, t) + V(F(x, u, t), t + 1).$$

- $U(x, t)$, $V(x, t)$ sans mémoire, fonctions seulement de x et t .

Trouver la fonction de valeur $V(x, 1)$

- ▶ Une condition terminal : $V(x, T + 1) = W(x)$, une fonction connue.
- ▶ Les autres $V(\cdot, t)$ par raisonnement rétrograde : application de l'opérateur définie par

$$V(x, t) = \sup_{u \in D(x, t)} \pi(x, u, t) + V(F(x, u, t), t + 1).$$

- ▶ Attention : l'opérateur prend une fonction de x et donne une fonction de x .

Le problème déterministe à horizon infinie

- ▶ La fonction de valeur est maintenant définie de façon récursive :

$$V(x) = \sup_{u \in D(x)} \pi(x, u) + \beta V(F(x, u)),$$

ou $V = TV$; V est une fonction de $x \in X$, T est un opérateur.

- ▶ La solution résout une équation *fonctionnelle*.
- ▶ Le théorème des applications contractantes (contraction mapping theorem) : si $0 < \beta < 1$, $\pi(x, u)$ est borné et X est compacte,
 - ▶ T est monotone ($y_1 \geq y_2 \Rightarrow Ty_1 \geq Ty_2$)
 - ▶ T est une contraction de module β ($\|Ty_1 - Ty_2\| \leq \beta\|y_1 - y_2\|$)
 - ▶ $V = TV$ a une solution (T a un point fixe) unique.
- ▶ La fonction de politique est maintenant

$$U(x) \in \arg \max_{u \in D(x)} \pi(x, u) + \beta V(F(x, u)).$$

Comment appliquer l'opérateur en pratique

- ▶ Prenons l'exemple de l'accumulation de richesse.
- ▶ La fonction de valeur est un point fixe de l'opérateur T , où

$$(TV)(k) \equiv \max_{0 \leq c \leq F(k)} u(c) + \beta V(F(k) - c).$$

- ▶ Comment trouver une approximation de $V(k)$?
- ▶ Une méthode : permettre seulement les valeurs de k sur une grille $K = \{k^m, \dots, k^M\}$.
- ▶ En pratique il faut prendre $k^+ \equiv F(k) - c$, le capital à la prochaine période, comme la variable de commande.
- ▶ L'équation Bellman avec le changement de variables :

$$V(k) = \max_{k^+ \geq 0} u(F(k) - k^+) + \beta V(k^+).$$

- ▶ L'équation Bellman avec $V: K \rightarrow K$ au lieu de $V: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}_+$:

$$V(k) = \max_{k^+ \in K} u(F(k) - k^+) + \beta V(k^+).$$

- ▶ Elle est un système d'équations non-linéaire; la solution est un vecteur.

Exemple

Prenons :

- ▶ $\beta = 0.96$
- ▶ $u(c) = c^{\gamma+1}/(\gamma+1)$, $\gamma = -2$.
- ▶ $F(k) = k + f(k)$, où $f(k) = \frac{1-\beta}{\alpha\beta} k^\alpha$, $\alpha = 0.25$
- ▶ $K = \{0.8, 0.8 + \kappa, 0.8 + 2\kappa, \dots, 1.2\}$.

Notes :

- ▶ k^{ss} est un état stationnaire si $k^{ss} + F(k^{ss}) - C(k^{ss}) = k^{ss}$.
- ▶ β dans la fonction de production est étrange, le coefficient $(1 - \beta)/(\alpha\beta)$ fait en sorte que $k^{ss} = 1$.

Choisir une fonction de valeur initiale

- ▶ La commande $C(k) = f(k)$ est faisable, mais pas optimal si $k \neq 1$.
- ▶ Autour de $k = k^{ss}$, $C(k)$ devrait être près de la commande optimale.
- ▶ La commande tient constant l'état k .
- ▶ La fonction de valeur $V^c(k)$ associée à la commande $C(k)$ vérifie

$$V^c(k) = u(f(k)) + \beta V^c(k), \text{ ou } V^c(k) = u(f(k))/(1 - \beta).$$

- ▶ Notez que $V^c(k) \leq V(k)$, où $V(k)$ est la fonction de valeur de la politique optimale.
- ▶ Considérez aussi $V_z(k) = 0$ comme fonction de valeur initiale.

Code initial : préférences et technologies

```
# Valeurs des paramètres
gamma <- -2.0      # Paramètre de préférence
beta  <- 0.96      # Paramètre d'impatience
alpha <- 0.25      # Paramètre de production

# Fonction d'utilité
u <- function(c) {
  ifelse(c>0, c^(gamma + 1)/(gamma + 1), -Inf)
}

# Fonction de production
f <- function(k) {
  ((1-beta)/(alpha*beta)) * k^alpha
}
```

Code initial : grille et précomputation

```
# Grille de capital
kappa <- 0.001
k <- seq(0.5, 1.5, by=kappa)
N <- length(k)

# Matrice de valeurs de  $u(k + f(k) - k+)$ 
u_k <- function(k, kplus) {
  u(k + f(k) - kplus)
}
u_tab <- outer(k, k, u_k)

# Fonction de valeur initial, épargne zéro
V_c <- u(f(k))/(1-beta)

# Fonction de valeur initial, zéro
V_z <- rep(0, N)
```

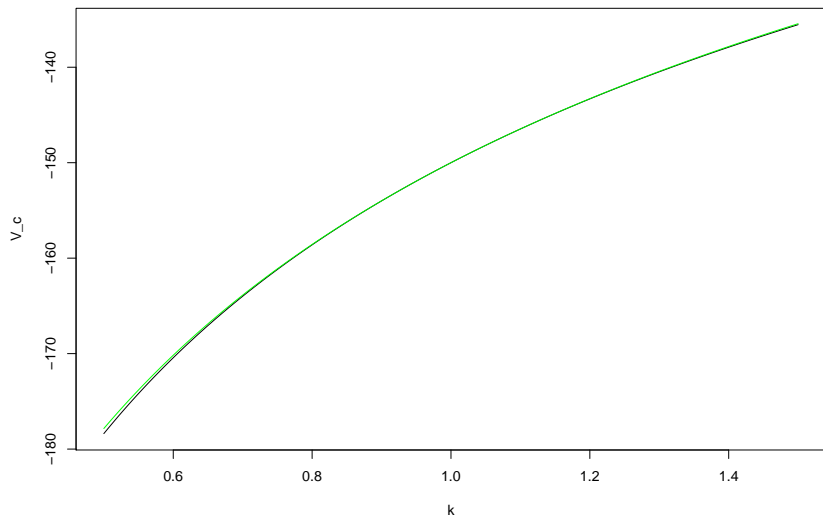
Code, itération de la fonction de valeur

```
# Iteration de la fonction de valeur
VU_suiv <- function(V) {
  V_suiv <- rep(0, N);
  U_suiv <- rep(0, N); U_suiv_i <- vector('integer', N)
  for (i in 1:N) {
    # k[i_plus] est la commande optimale à l'état k[i]
    i_plus = which.max(u_tab[i,] + beta*V)
    U_suiv[i] = k[i_plus]; U_suiv_i = i_plus
    # V_suiv[i] est la fonction V suivante à l'état k[i]
    V_suiv[i] = u_tab[i, i_plus] + beta*V[i_plus]
  }
  list(V=V_suiv, U=U_suiv, U_i=U_suiv_i)
}

# Une itération de T à partir de V_c
VUs_c <- VU_suiv(V_c)
```

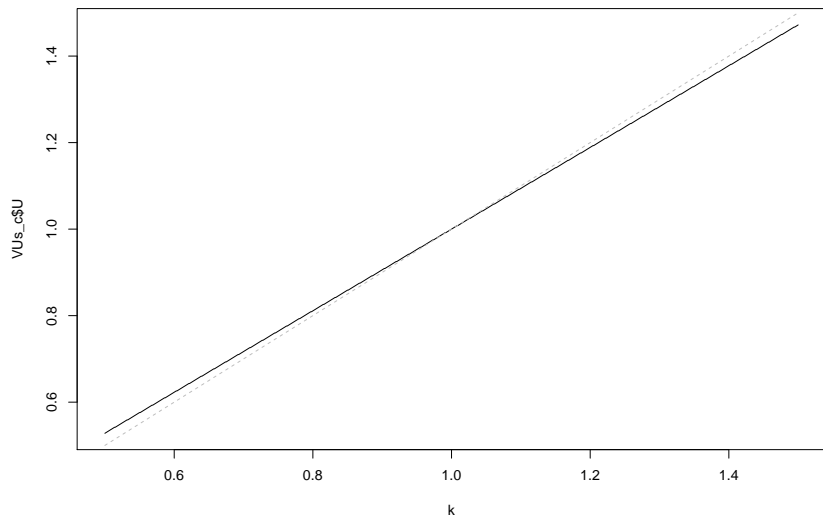
La fonction de valeur $TV_c(k)$ (une itération)

```
plot(k, V_c, type='l')  
lines(k, VUs_c$V, col='green')
```



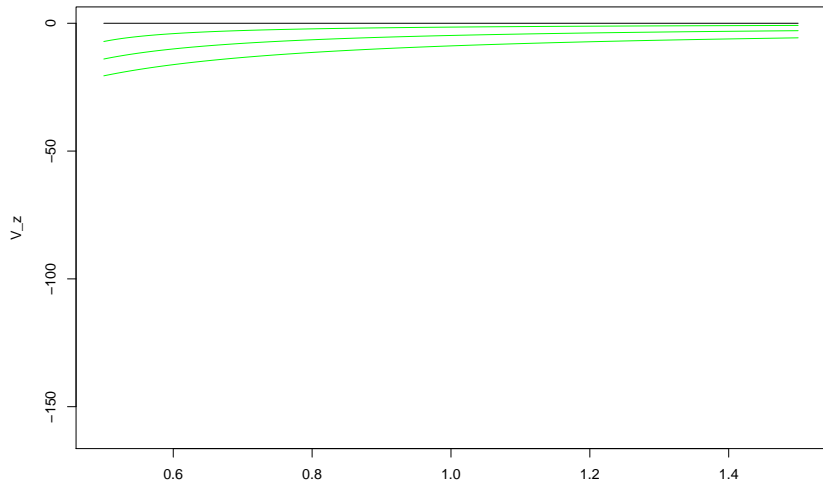
La fonction de politique après une itération de $V_c(k)$

```
plot(k, VUs_c$U, type='l')  
lines(k, k, lty='dashed', col='grey')
```



Les fonctions de valeur $T^i V_z(k)$, $i = 1, 2, 3$

```
plot(k, V_z, type='l', ylim = c(-160, 0)); V = V_z
for (i in 1:3) {
  V <- VU_suiv(V)$V; lines(k, V, col='green')
}
```



Itération de la fonction de politique : approximation de V^U pour U donnée

- Pour une fonction de politique $k^+ = U(k)$, pas forcément optimale, on peut calculer, pour chaque $k_0 \in K$, la suite d'état

$$k_0, U(k_0), U^{(2)}(k_0), U^{(3)}(k_0), \dots,$$

où $U^{(0)}(k_0) = k_0$, $U^{(i+1)}(k_0) = U(U^{(i)}(k_0))$.

- On peut approximer la fonction de valeur de cette politique, le vecteur $V^U(k_0)$, $k_0 \in K$ par $\hat{V}^U(k_0)$ défini comme

$$\sum_{t=0}^T \beta^t u(U^{(t)}(k_0) + f(U^{(t)}(k_0)) - U^{(t+1)}(k_0)) + \beta^{T+1} \tilde{V}(U^{(T+1)}(k_0)),$$

où \tilde{V} est une approximation de la fonction de valeur optimale.

- Si on fait ce calcul directe pour chaque k_0 il peut y avoir des calculs redondants; pire, le calcul directe ne marche pas pour les problèmes analogues stochastiques.

La version rétrograde de l'approximation de V^U

Cette version rétrograde évite des calculs redondants et se généralise aux problèmes stochastiques, équation (12.4.2) de Judd :

- ▶ $W^0 = V$ (vecteur!)
- ▶ Pour $j = 0, \dots, T$:
 - ▶ Pour $k \in K$,

$$W^{j+1}(k) = u(k + f(k) - U(k)) + \beta W^j(U(k)).$$

- ▶ $V^U \approx \hat{V}^U \equiv W^{k+1}$ (vecteur!)

Itération de la fonction de politique

Itérez les étapes suivantes jusqu'à ce que $\|V^{l+1} - V^l\| < \epsilon$:

1. Utilisez V^l pour calculer U^{l+1} , la fonction de politique sous-produite par l'itération de la fonction de valeur.
2. Utilisez U^{l+1} et V^l (pour la valeur résiduelle à $t = T + 1$) pour calculer V^{l+1} comme

$$V^{l+1} \equiv \hat{V}^{U^{l+1}}$$

Problèmes dynamiques avec incertitude

- ▶ Soit X l'ensemble d'états possibles.
- ▶ Rappel, évolution des états dans les modèles déterministes :

$$x_{t+1} = F(x_t, u_t, t) \quad \text{ou} \quad x_{t+1} = F(x_t, u_t).$$

- ▶ Dans les modèles stochastiques, l'évolution de l'état devient stochastique :

$$F(A, x_t, u_t, t) \equiv \Pr[x_{t+1} \in A | x_t, u_t, t], \quad A \subseteq X.$$

- ▶ Le problème général est la maximisation de

$$E \left[\sum_{t=1}^T \pi(x_t, u_t, t) + W(x_{T+1}) \right] \quad \text{ou} \quad E \left[\sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \pi(x_t, u_t) \right].$$

sous les contraintes décrites en termes de $F(\cdot)$, $D(\cdot)$ et x_0 .

- ▶ Notez la séparabilité et la linéarité :
 - ▶ temporelle dans les problèmes déterministes et stochastiques,
 - ▶ l'espérance dans les problèmes stochastiques.

Structure intertemporelle avec incertitude

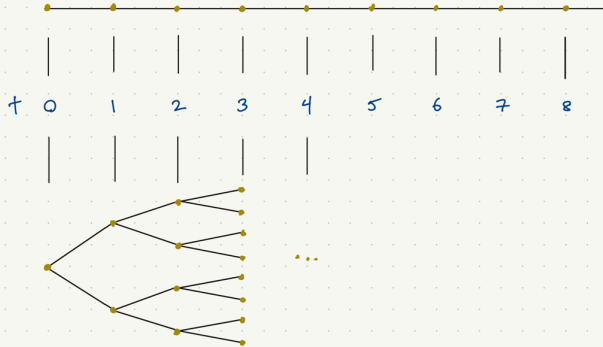


Figure 1: Deux structure avec autosimilarité

Les équations de Bellman dans le cas stochastique

Horizon fini :

$$V(x, t) = \sup_{u \in D(x_t, t)} \pi(x, u, t) + E[V(x_{t+1}, t+1) | x_t = x, u_t = u],$$

$$V(x, T+1) = W(x).$$

Horizon infini :

$$V(x) = \sup_{u \in D(x)} \pi(x, u) + \beta E[V(x^+) | x, u].$$

Exemple, modèle de recherche de McCall

- ▶ Une simplification du modèle de McCall (1970) dans “Quantitative Economics with Python” par Sargent et Stachurski, section [Job Search I: The McCall Search Model](#)
- ▶ L'état est la réalisation w_t d'une offre de salaire aléatoire.
- ▶ La densité $q(w_t|w_{t-1}, u_{t-1}) = q(w_t)$ ne dépend pas de w_{t-1} , u_{t-1} . Soit W l'ensemble de valeurs possibles des w_t .
- ▶ L'action u_t est d'accepter l'offre w_t et gagner w_t chaque période à tout jamais ($u_t = 1$) ou de rejeter l'offre, gagner c à t et attendre une autre offre ($u_t = 0$).
- ▶ L'agent maximise

$$E \left[\sum_{t=0}^{\infty} \beta^t y_t \right],$$

où y_t dépend du moment t^* où l'agent accepte l'offre :

$$y_t \equiv \begin{cases} c & t < t^* \\ w_{t^*} & t \geq t^* \end{cases}$$

L'équation de Bellman

L'équation de Bellman est

$$\begin{aligned} V(w) &= \max \left\{ \frac{w}{1-\beta}, c + \beta E[V(w')] \right\} \\ &= \max \left\{ \frac{w}{1-\beta}, c + \beta \sum_{v \in W} V(v) q(v) \right\}. \end{aligned}$$

Notes :

- ▶ Le terme $c + \beta E[V(w')]$ ne dépend pas de w , ce qui simplifie énormément le problème.
- ▶ L'action optimale $\sigma(w) \in \{0, 1\}$ doit être de la forme où l'agent accepte une offre plus grande ou égale à \bar{w} et rejette une offre moins grande que \bar{w} .
- ▶ Le salaire de réserve \bar{w} est $(1 - \beta)(c + \beta E[V(w')])$.
- ▶ Intuition : \bar{w} devrait être croissant en β et c .

La spécification du problème

La spécification :

- ▶ Valeurs des paramètres : $\beta = 0.99$, $c = 25$.
- ▶ Loi de w : $w - 10 \sim \text{Bb}(50, 200, 100)$ (beta-binomial)
- ▶ $k \equiv w - 10$ est un mélange : $\pi \sim \text{Be}(200, 100)$,
 $k|\pi \sim \text{Bi}(50, \pi)$.

```
# Valeurs des paramètres
```

```
beta <- 0.99
```

```
c <- 25
```

```
# Loi de w : valeurs w, probabilités q
```

```
w <- 10:60
```

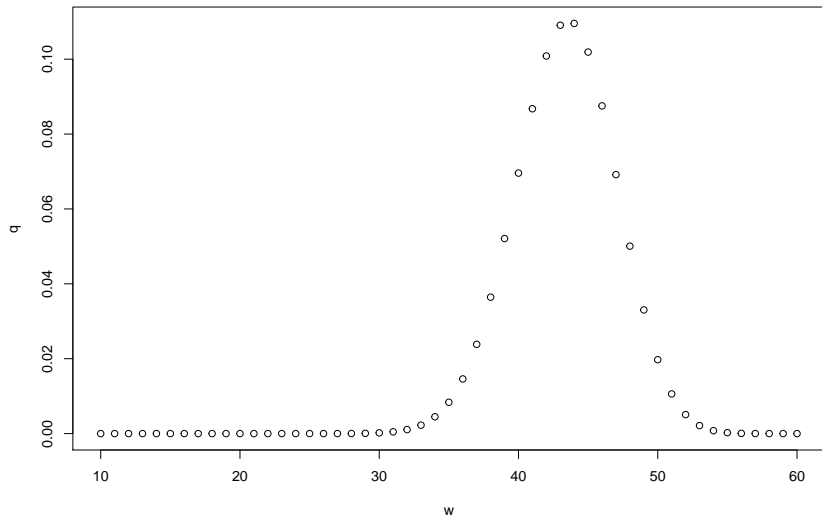
```
n = 50; a <- 200; b <- 100; k <- w-10
```

```
lnq <- lchoose(n, k) + lbeta(a+k, b+n-k) - lbeta(a, b)
```

```
q <- exp(lnq)
```

La loi discrète des offres de salaire

```
plot(w, q, type='p')
```



L'itération de la fonction de valeur

- ▶ Dans un premier temps, on ne profite pas de la structure du problème.
- ▶ On commence par la fonction de valeur qui correspond à la politique $\sigma_0(w) = 1$, selon laquelle on accepte chaque offre :

$$V^{\sigma_0}(w) = \frac{w}{1 - \beta}.$$

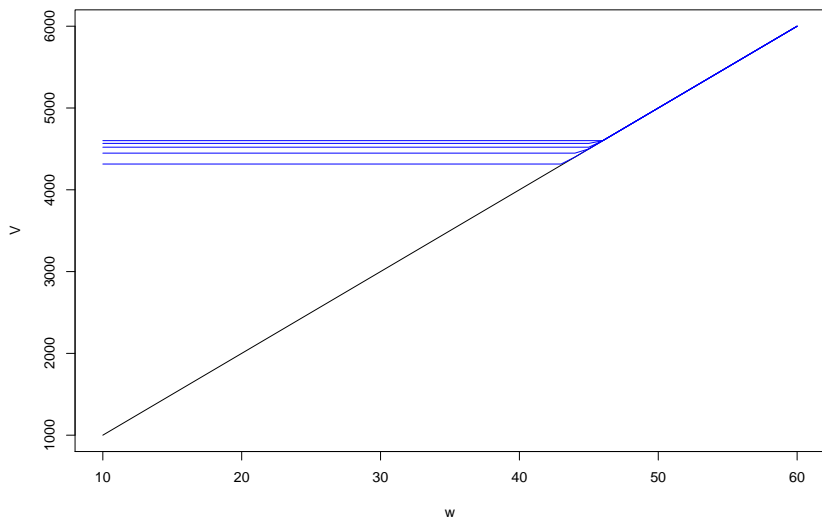
- ▶ On applique l'opérateur T de façon répétitive jusqu'à la convergence, où

$$(TV)(w) = \max \left\{ \frac{w}{1 - \beta}, c + \beta \sum_{v \in W} V(v)q(v) \right\}.$$

```
library(geometry)
V0 <- w/(1-beta)
T <- function(V) {pmax(w/(1-beta), c+beta*dot(V, q))}
```

Iteration de la fonction de valeur en graphiques

```
V = V0; plot(w, V, type='l')  
for (i in 1:5) {V = T(V); lines(w, V, col='blue')}
```



L'itération du salaire de réserve

- ▶ On définit $h = \bar{w}/(1 - \beta) = c + \beta E[V(w')]$.
- ▶ En termes de h , l'équation de Bellman s'écrit

$$V(w) = \max \left\{ \frac{w}{1 - \beta}, h \right\}.$$

- ▶ Si on substitue $V(w)$ dans la définition de h , on obtient

$$h = c + \beta E \left[\max \left\{ \frac{w'}{1 - \beta}, h \right\} \right]$$

- ▶ On peut résoudre cette équation non-linéaire avec l'itération

$$h' = c + \beta \sum_{v \in W} \max \left\{ \frac{v}{1 - \beta}, h \right\} q(v)$$

- ▶ C'est une équation scalaire, mais il faut toujours calculer un produit intérieur par itération.

L'itération du salaire de réserve

```
wbar <- function(beta_c, tol) {  
  beta <- beta_c[1]; c <- beta_c[2]  
  h <- c / (1-beta)  
  repeat {  
    h_plus <- c + beta * dot(pmax(w/(1-beta), h), q)  
    if (abs(h - h_plus) < tol) break  
    h <- h_plus  
  }  
  wbar <- (1-beta) * h  
}
```


Code préliminaire pour les graphiques

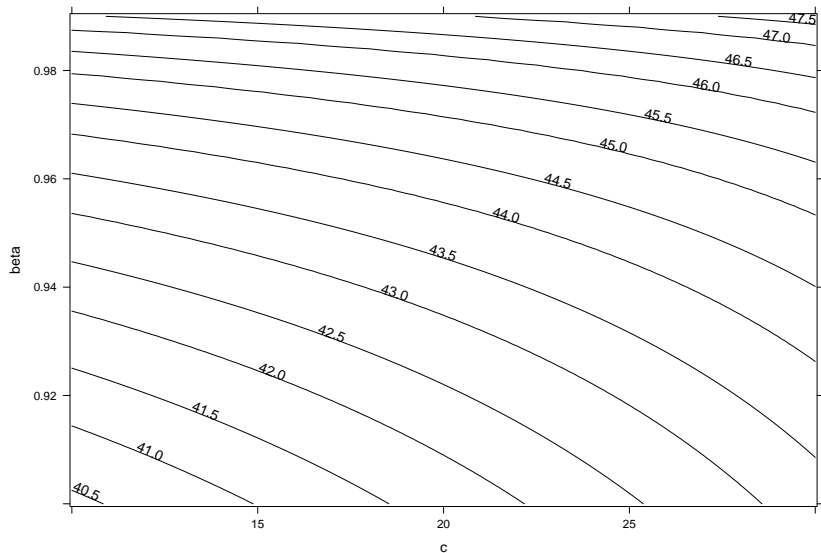
```
# Grilles de points pour beta et c
beta_gr <- seq(0.9, 0.99, by=0.001)
c_gr <- seq(10, 30, by=0.1)

# Tableau des pairs (beta, c)
bc <- as.matrix(expand.grid(beta_gr, c_gr))
colnames(bc) <- c('beta', 'c')

# Évaluer la fonction wbar à chaque pair (beta, c)
wbar_c <- apply(bc, 1, wbar, tol = 1e-6)
df <- data.frame(wbar_fn = wbar_c, bc)
```

Salaire de réserve comme fonction de β et c

```
library(lattice)
contourplot(wbar_fn ~ c*beta, data=df, cuts=12)
```



Un modèle avec séparation

- ▶ Un autre modèle du type McCall au site QuantEcon
- ▶ [Job Search II: Search and Separation](#)
- ▶ L'agent entre dans la période t
 - ▶ ou avec emploi à salaire w_e , auquel cas l'agent reçoit le flux d'utilité $u(w_e)$ et ensuite est congédié avec probabilité α .
 - ▶ ou sans emploi, auquel cas l'agent reçoit une offre w_t et choisit entre travailler au salaire w_t (jusqu'au congédiement) ou recevoir c et rester sans emploi au début de la prochaine période. Le flux d'utilité est $u(w_t)$ ou $u(c)$, respectivement.
- ▶ La fonction d'utilité est

$$E \left[\sum_{t=0}^{\infty} \beta^t u(y_t) \right].$$

- ▶ Soit $v(w_e)$ l'utilité d'un agent avec emploi au début de la période, au salaire w_e .
- ▶ Soit $h(w)$ l'utilité d'un agent sans emploi qui reçoit une offre w au début de la période.

Les équations de Bellman

Les deux équations tiennent de façon simultanée :

$$v(w_e) = u(w_e) + \beta \left[(1 - \alpha)v(w_e) + \alpha \sum_{w' \in W} h(w')q(w') \right],$$

$$h(w) = \max \left\{ v(w), u(c) + \beta \sum_{w' \in W} h(w')q(w') \right\}.$$

Encore une fois, une simplification est utile :

$$d \equiv E[h(w')] = \sum_{w' \in W} h(w')q(w').$$

On peut écrire maintenant (pas besoin de distinguer w et w_e)

$$v(w) = u(w) + \beta[(1 - \alpha)v(w) + \alpha d],$$

$$h(w) = \max\{v(w), u(c) + \beta d\},$$

$$d = \sum_{w' \in W} h(w')q(w') = \sum_{w' \in W} \max\{v(w'), u(c) + \beta d\}q(w').$$

Notes sur le problème

- L'équation pour $h(w)$ étant éliminée, on peut itérer :

$$d_{n+1}(w) = \sum_{w' \in W} \max\{v_n(w'), u(c) + \beta d_n\} q(w'),$$

$$v_{n+1}(w) = u(w) + \beta[(1 - \alpha)v_n(w) + \alpha d_n].$$

- Le salaire de réserve \bar{w} est maintenant la solution de l'équation

$$v(\bar{w}) = u(c) + \beta d.$$

La spécification du problème

- La fonction d'utilité :

$$u(c) = \frac{c^{1-\sigma} - 1}{1 - \sigma}$$

- Les valeurs des paramètres sont : $\alpha = 0.2$, $\beta = 0.98$, $\sigma = 2$, $c = 6$.
- Loi de w : $\frac{59}{19}(w - 10) \sim \text{Bb}(59, 600, 400)$ (beta-binomial)

```
# Valeurs des paramètres
```

```
alpha <- 0.2; beta <- 0.98; sigma <- 2; c <- 6
```

```
# Loi de w : valeurs w, probabilités q
```

```
w <- seq(10, 20, length=60)
```

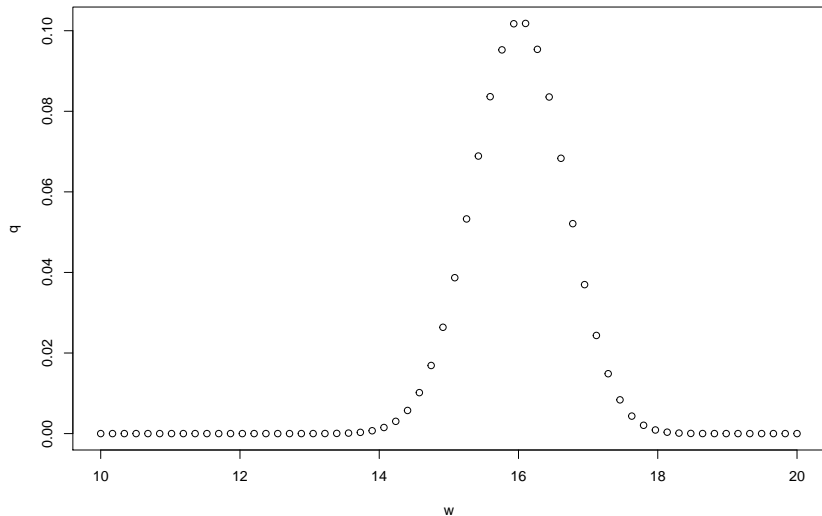
```
n = 59; a <- 600; b <- 400; k <- (59/10)*(w-10)
```

```
lnq <- lchoose(n, k) + lbeta(a+k, b+n-k) - lbeta(a, b)
```

```
q <- exp(lnq)
```

La loi discrète des offres de salaire

```
plot(w, q, type='p')
```



L'itération en code

```
# Fonction d'utilité et des évaluations préliminaires
u <- function(w, sigma) { (w^(1-sigma)-1) / (1-sigma) }
uw = u(w, sigma)
uc = u(c, sigma)

# Itération de Bellman
T <- function(vd) {
  v_plus <- uw + beta * ((1-alpha) * vd$v + alpha * vd$d)
  d_plus <- sum(pmax(vd$v, uc + beta * vd$d) * q)
  list(v = v_plus, d = d_plus)
}
```


Trouver les fonctions de valeur

```
solve_model <- function(tol=1e-5, max_iter=2000) {  
  vd <- list(v = rep(1, length(w)), d=1)  
  for (i in 1:max_iter) {  
    Tv_d <- T(vd)  
    err1 <- max(abs(vd$v - Tv_d$v))  
    err2 <- abs(vd$d - Tv_d$d)  
    if (max(err1, err2) < tol)  
      break  
    vd <- Tv_d  
  }  
  Tv_d  
}  
  
vd <- solve_model()
```

Graphique de la fonction de valeur

```
plot(w, vd$v, type='l', xlab='w', ylab='v, h')  
abline(h = uc + beta * vd$d)
```

