

Projet BIO401-Partie 1

AmigoTeam

2024-04-07

Article de référence : Blackwood, J.C., Hastings, A. and Mumby, P.J. (2011), A model-based approach to determine the long-term effects of multiple interacting stressors on coral reefs. *Ecological Applications*, 21: 2722-2733. <https://doi.org/10.1890/10-2195.1> (<https://doi.org/10.1890/10-2195.1>)

Les analyses du modèle ont été faites par : Antoine Castonguay et Félix Richard

Partie 1 :

Question biologique :

Comment la résilience des récifs coralliens, soit la capacité à ne pas s'effondrer suite à un stress ou une perturbation varie-t-elle selon l'effort de pêche, l'impact des ouragans et la rugosité initiale?

Hypothèse :

1. La résilience diminue quand l'effort de pêche augmente.
2. La résilience diminue quand les ouragans sont plus fréquents.
3. La résilience diminue quand les ouragans sont plus puissants.
4. La résilience diminue quand la rugosité est faible.

Données :

Tableau 1 : Paramètres utilisés dans le modèle de référence et leurs définitions.

Paramètre	Valeur	Définition
s	0.49	Taux de croissance des poissons perroquets par année
r	1	Taux pour lequel le corail remplace le gazon d'algues par année
a	0.1	Taux pour lequel les macroalgues remplacent le corail par année
gamma	1.6, 0.8	Taux pour lequel les macroalgues remplacent le gazon d'algues par année
d	0.44	Taux de mortalité du corail par année
Alpha	1	Taux de broutage maximal par le poisson perroquet
f	variable	Effort de pêche en pourcentage

Paramètre	Valeur	Définition
c1,c2	3.65,-3.21	Détermine la relation entre la complexité du corail et la capacité de support du poisson perroquet
delta,v	4.557,0.9877	Détermine la relation entre la nourriture disponible et la capacité de support du poisson perroquet
Beta	1	Capacité de support de l'environnement pour le poisson perroquet relatif
hG	0.03	Rétablissement de la complexité du corail par année
hE	0.01	Érosion de la complexité du corail par année
kmax	17.745	Limite supérieure d'abondance des poisson perroquets
F()	$0.0512 + 0.0176 \cdot te$, 0	La proportion de la couverture corallienne affectée par un ouragan respectivement fort/moyen et faible
G()	0.5, F, 0.05	La proportion attendue de rugosités affectée par les impacts des ouragans respectivement fort, moyenne et faible
mH	0.8	Taux de mortalité des macroalgues suite à un ouragan
te	variable	Temps écoulé depuis le dernier ouragan en année
sigma	0.05	Écart maximal de la variabilité des impacts des ouragans d'épsilon
epsilon	entre 0 et 1	Variable aléatoire suivant une distribution normale standard qui décrit la composante aléatoire des impacts des ouragans sur le corail

Tableau 2 : Variables utilisées dans le modèle de référence avec leur définition ainsi que leurs limites.

Variable	Valeurs possibles	Définition
C	entre 0 et 1	Corresponds à la proportion de couverture du paysage par le corail. Où 1 est un couvert total et où 0 est l'absence de corail.
M	entre 0 et 1	Corresponds à la proportion de couverture du paysage par les macroalgues. Où 1 est un couvert total et où 0 est l'absence des macroalgues.
P	entre 0 et 1	Corresponds à la taille de population des poisson perroquets relativement à leur capacité de soutien. Il vaut 1 lorsque la capacité de support est atteinte et il vaut 0 si les poissons-perroquets sont absents.

Variable	Valeurs possibles	Définition
R	entre 1 et 3	Corresponds à la rugosité des récifs coralliens, où 1 équivaut à une structure parfaitement lisse et où 3 représente une complexité tridimensionnelle prononcée, rarement atteinte, qui offrant une très bonne qualité d'habitat.
Y	entre 0 et 1	Corresponds à la proportion de couverture du paysage par du gazon d'algue. Remplis l'espace inoccupé par le corail ou les macroalgues.

Méthode :

Modèle de rugosité fixe:

$$\begin{aligned}\frac{dC}{dt} &= rTC - dC - aMC \\ \frac{dM}{dt} &= aMC - \frac{\alpha \frac{P}{\beta} M}{M+Y} - \gamma MY \\ \frac{dP}{dt} &= sP \left(1 - \frac{P}{\beta K(M+T,R)}\right) - sfP \\ \frac{dY}{dt} &= 1 - M - C\end{aligned}$$

La capacité de support de l'environnement pour le poisson perroquet prend en compte l'abondance des algues, qui constituent leur nourriture, ainsi que la rugosité, qui constitue de l'habitat $K(M + T, R)$.

$$K(M + T, R) = \frac{(c1R+c2)}{K_{max}} \frac{\delta(M+Y)}{1+v(M+Y)}$$

Modèle Nondimensionner par rapport aux taux de croissance des poisson perroquets par année avec rugosité fixe:

$$\begin{aligned}\frac{dC}{dts} &= (rTC - dC - aMC) \frac{1}{s} \\ \frac{dM}{dts} &= \left(aMC - \frac{\alpha \frac{P}{\beta} M}{M+Y} - \gamma MY\right) \frac{1}{s} \\ \frac{dP}{dts} &= P \left(1 - \frac{P}{\beta K(M+T,R)}\right) - fP \\ \frac{dY}{dts} &= 1 - M - C\end{aligned}$$

Modèle avec une rugosité variable:

$$\begin{aligned}\frac{dC}{dt} &= rTC - dC - aMC \\ \frac{dM}{dt} &= aMC - \frac{\alpha \frac{P}{\beta} M}{M+Y} - \gamma MY \\ \frac{dP}{dt} &= sP \left(1 - \frac{P}{\beta K(M+T,R)}\right) - sfP \\ \frac{dR}{dt} &= h_G C(3 - R) - h_E (1 - C)(R - 1) \\ \frac{dY}{dt} &= 1 - M - C\end{aligned}$$

Mise en œuvre d'un ouragan stochastique:

$$\begin{aligned}dC &= g_C(C, M, P, R, t)dt - C(F() + \sigma\epsilon)dq \\ dM &= g_M(C, M, P, R, t)dt - Mm_H dq \\ dP &= g_P(C, M, P, R, t)dt \\ dR &= g_R(C, M, P, R, t)dt - (R - 1)(G() + \sigma\epsilon)dq \\ dY &= 1 - M - C\end{aligned}$$

$F() = 0.0512 + 0.0176 * te$ avec un maximum de $F() = 0.5$. $G()$ est soit 0.5 pour un impact élever, $F()$ pour un impact moyen et 0.05 pour un impact faible.

où $g_C(C, M, P, R, t)$, $g_M(C, M, P, R, t)$, $g_P(C, M, P, R, t)$, $g_R(C, M, P, R, t)$ sont des fonctions qui représente le modèle avec un rugosité variable.

Et où q est un processus de saut de Poisson avec un taux de saut λ tel que $dq = 0$ avec une probabilité de $1 - \lambda dt$ et $dq = 1$ avec une probabilité de λdt .

Supposition :

1. Aucun changement dans la température, la chimie de l'eau ou l'élévation du niveau de la mer n'est significatif sur l'échelle du temps étudié.
2. Les perturbations ou stress des récifs coralliens autres que les ouragans, les impacts indirects de la pêche ou la compétition de l'espace avec les macroalgues ne sont pas pris en compte.
3. L'effort de pêche est constant pour toutes les années de la simulation.
4. Après un ouragan, le gazon d'algues colonise immédiatement tout l'espace libre.
5. Le gazon d'algue correspond à toute la surface qui n'est pas des coraux ou des macroalgues.
6. Les ouragans n'ont pas d'effets directs significatifs sur l'abondance ou la croissance des poisson perroquets.
7. Les macroalgues ont le même niveau de dommage, peu importe le niveau d'impact des ouragans.
8. Les ouragans ont un impact et une fréquence constante sur toute la durée de la simulation.
9. Les effets des ouragans sont immédiats sur les populations de l'écosystème.
10. La distribution des coraux, des algues macroscopiques et des poissons-perroquets dans l'espace n'a pas d'impact sur leur dynamique.
11. Un ouragan affecte l'ensemble de l'écosystème de façon égale.
12. Les ouragans suit un processus de saut de Poisson avec un taux de saut λ tel que $dq = 0$ avec une probabilité de $1 - \lambda dt$ et $dq = 1$ avec une probabilité de λdt .
13. Tous les paramètres du modèle sont représentatifs de la situation réelle de l'écosystème.
14. Il est impossible pour le corail et les macroalgues de s'éteindre totalement.

Calcul :

```
# Chargement de Librairie
library(deSolve)
library(fields)
```

```
## Le chargement a nécessité le package : spam
```

```
## Spam version 2.10-0 (2023-10-23) is loaded.
## Type 'help( Spam)' or 'demo( spam)' for a short introduction
## and overview of this package.
## Help for individual functions is also obtained by adding the
## suffix '.spam' to the function name, e.g. 'help( chol.spam)'.
```

```
##
## Attachement du package : 'spam'
```

```
## Les objets suivants sont masqués depuis 'package:base':
##
##      backsolve, forwardsolve
```

```
## Le chargement a nécessité le package : viridisLite
```

```
##
## Try help(fields) to get started.
```

```
library(viridis)
```

```
# Fonction pour le modèle nondimensionnel par rapport taux de croissance des poissons perroquet par année avec rugosité fixe :
```

```
interaction_coral <- function(t, vars, parms){
  with(as.list(c(parms, vars)), {

    Y <- 1 - M - C # dY/dt
    R <- rug

    dM <- (a*M*C - P*M/(M+Y) + gamma*M*Y)/s # dM/dt
    dC <- (r*Y*C - d*C - a*M*C)/s # dC/dt
    dP <- P*(1 - (P/(((ca+cb*R)/kmax)*((delta*(M+Y))/(1+v*(M+Y)))))) - (f)*P # dP/dt

    # Résultat
    res <- c(dM=dM, dC=dC, dP=dP)
    return(list(res))
  })
}
```

```
# Fonction pour effectuer une simulation du modèle
```

```
dessinSol <- function(ic=c(M=0.001,C=0.56,P=0.75),
  times=seq(1:30),func=interaction_coral,
  parms=c(a=0.1,
    d=0.44,
    r=1,
    f=0.2,
    s=0.49,
    ca=-(3.21),
    cb=3.65,
    kmax=17.745,
    delta=4.557,
    v=0.9877,
    hG=0.03,
    hE=0.01,
    gamma = 0.8,
    rug=2)) {
  soln <- ode(ic, times, func, parms)

  return(soln[30,"C"])
}
```

```
# Code pour figure 1
# Matrice des valeur finale de la proportion de corail apres "times" ans
coral <- matrix(data = NA, nrow = 41, ncol = 41)

# Boucle sur fish
for (i in 1:41) {
  fish <- (i - 1) * (1 / 40) # Calcul de la valeur de fish

  # Boucle sur rugosité
  for (j in 1:41) {
    rugo <- 1 + (j - 1) * (2 / 40) # Calcul de la valeur de rugosité

    # Appel de la fonction de simulation et mise à jour de la matrice coral
    res <- dessinSol(ic = c(M = 0.001, C = 0.56, P = 0.95),
                     parms = c(a = 0.1, d = 0.44, r = 1, f = fish,
                               s = 0.49, ca = -3.21, cb = 3.65, kmax = 17.745,
                               delta = 4.557, v = 0.9877, hG = 0.03, hE = 0.01,
                               gamma=1.6,rug=rugo))

    # Attribut la dominance du corail, des macroalgue ou d'une instabilité apres time ans
    if(res<0.0001){
      color.tag <- 0
    }else if(res<0.45){
      color.tag <- 0.5
    }else{
      color.tag <- 1
    }

    coral[j,i] <- color.tag
  }
}
```

```

# code pour figure de 2
# Différent état de rugosité de départ
rug.vec <- c(1.8,2.1,2.4)
fish.vec <- data.frame()

# Pour chaque rugosité calcule une situation favorable et défavorable au corail et la zone intermédiaire correspond a une zone d'instabilité entre les deux droite.
for (j in seq(3,9,by=3)) {
  for (i in 1:50) {
    fish <- (i - 1) * (1 / 50) # Calcul de la valeur de fish
    res <- dessinSol(ic = c(M = 0.2, C = 0.8, P = 0.75),
                    parms = c(a = 0.1, d = 0.44, r = 1, f = fish,
                              s = 0.49, ca = -3.21, cb = 3.65, kmax = 17.745,
                              delta = 4.557, v = 0.9877, hG = 0.03, hE = 0.01,
                              gamma=0.8,rug=rug.vec[j/3]))
    res2 <- dessinSol(ic = c(M = 0.8, C = 0.2, P = 0.75),
                    parms = c(a = 0.1, d = 0.44, r = 1, f = fish,
                              s = 0.49, ca = -3.21, cb = 3.65, kmax = 17.745,
                              delta = 4.557, v = 0.9877, hG = 0.03, hE = 0.01,
                              gamma=0.8,rug=rug.vec[j/3]))

    fish.vec[i,j-2] <- fish
    fish.vec[i,j-1] <- res
    fish.vec[i,j] <- res2
  }
}

```

Pour construire les graphiques du couvert de corail final moyen et de la rugosité finale moyenne selon la rugosité initiale et l'effort de pêche, nous avons utilisé la fonction suivante. Elle inclut l'incidence aléatoire d'ouragan avec différentes gravités d'impacts définis, et occupant à différentes fréquences moyennes. Les catégories d'impacts sont faibles (1), modérées (2) et importantes (3) et les différentes fréquences moyennes sont 1 fois par 9 ans (1/9), une fois par 15 ans (1/15) et une fois par 30 ans (1/30).

```
corailstochastique <- function (R0,f,lambda=1/30,impact=2,dt=1,graph=FALSE){  
  #on instaure une étendue de temps  
  tmax <- 100  
  t <- 0  
  #Le temps au dernier ouragan  
  to <- 0  
  
  #on pose les valeurs de départ et les paramètres  
  C <- 0.56  
  M <- 0.01  
  Y <- 0.43  
  R <- R0  
  P <- 0.5  
  a<-0.1  
  g<-0.8  
  d<-0.44  
  r<-1  
  f<-f  
  s<-0.49  
  ca<--(3.21)  
  cb<-3.65  
  kmax<-17.745  
  delta<-4.557  
  v<-0.9877  
  hG<-0.03  
  hE<-0.01  
  o <- 0.05  
  mH <- 0.8  
  
  #on initie les vecteurs de résultats  
  vecC <- C  
  vecM <- M  
  vecY <- Y  
  vecR <- R  
  vecP <- P  
  
  while (t<tmax){  
  
    #on effectue le tirage pour déterminer si il y a ou pas ouragan  
    ouragan <- pmin(rpois(1,lambda*dt),1)  
    #si oui ou non, on ajuste dq  
    if (ouragan==1){  
  
      #on calcule le temps depuis le dernier ouragan  
      te <- t - to  
  
      #on sauve le nouveau temps de dernier ouragan  
      to <- t  
  
      #on calcule F  
      F <- pmin(0.0512 + 0.0176*te, 0.5)
```



```

#différents dommages selon valeur d'impact
if (impact==3){
  #on calcule les dommages d'un fort ouragan
  dommC <- C*(F + o*runif(1))
  dommM <- M*mH
  dommR <- (R-1)*0.5
}
if (impact==2){
  #on calcule les dommages d'un moyen ouragan
  dommC <- C*(F + o*runif(1))
  dommM <- M*mH
  dommR <- (R-1)*(F + o*runif(1))
}
if (impact==1){
  #on calcule les dommages d'un faible ouragan
  dommC <- 0
  dommM <- M*mH
  dommR <- (R-1)*0.05
}
}else{
  dommC <- 0
  dommM <- 0
  dommR <- 0
}

#on calcule les changements
dM <- ((a)*M*C - ((1)*P*M/(M+Y)) + (g)*M*Y)*dt - dommM
dC <- ((r)*Y*C - (d)*C - (a)*M*C)*dt - dommC
dP <- ((s)*P*(1 - (P/((((ca+cb*R)/kmax)*((delta*(M+Y))/(1+v*(M+Y))))))) - (f*s)*P)*dt
dR <- ((hG)*C*(3 - R) - (hE)*(1 - C)*(R - 1))*dt - dommR

#on effectue les changements
M <- pmax(M + dM,0.0001)
C <- pmax(C + dC,0.0001)
Y <- 1 - M - C
R <- R + dR
P <- pmax(P + dP, 0.0001)

#on sauve les nouvelles valeurs dans leur vecteurs
vecC <- c(vecC,C)
vecM <- c(vecM,M)
vecY <- c(vecY,Y)
vecR <- c(vecR,R)
vecP <- c(vecP,P)

#on fait avancer le temps
t <- t + dt
}

#si on veut afficher les graphiques, on met TRUE à l'argument graph =
if (graph==TRUE){
  #on affiche le premier plot, avec la trajectoire du corail
  plot(seq(0,tmax,length.out = length(vecC)),vecC, type="l", col="red", ylim=c(0,1),

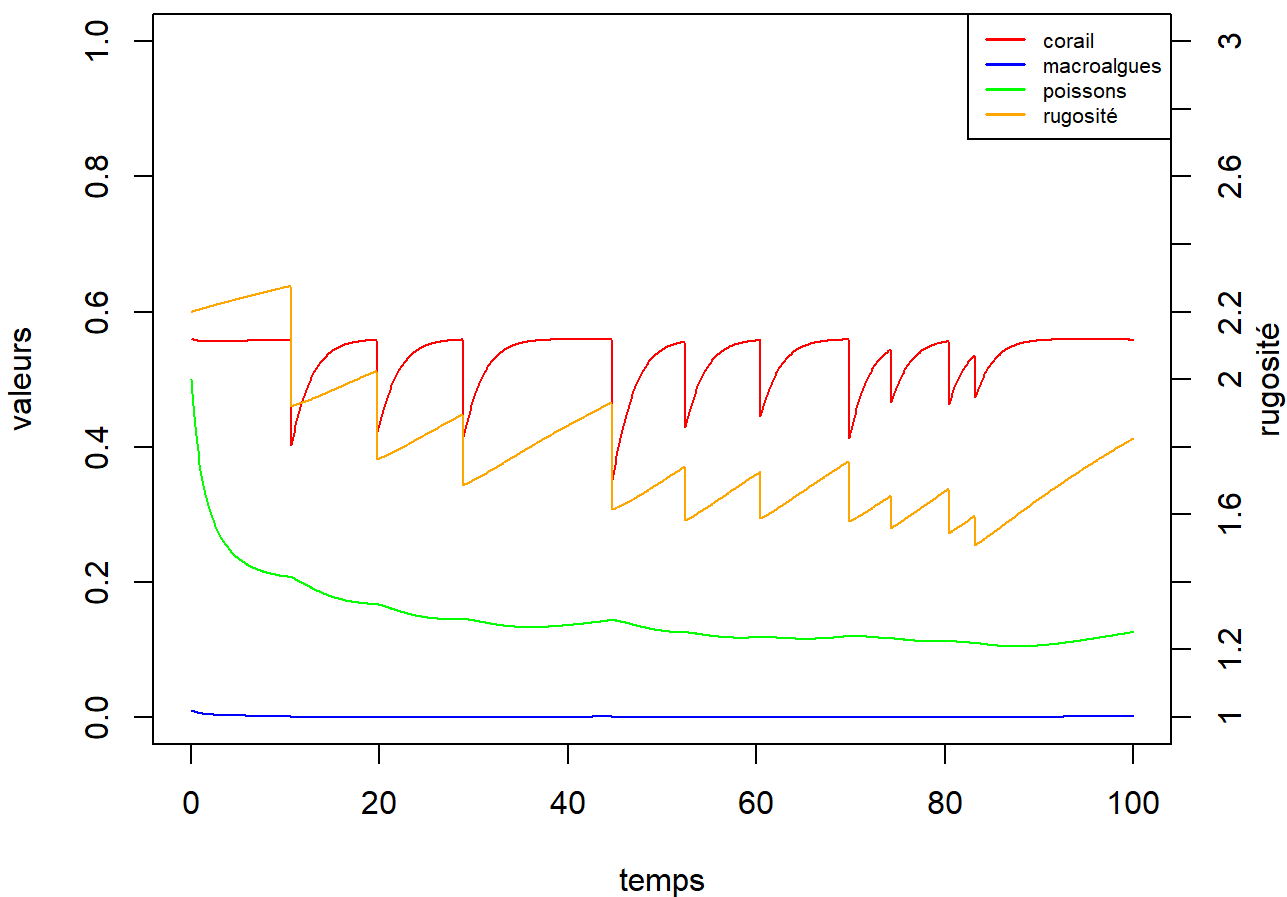
```

```

      xlab= "temps", ylab="valeurs")
#on ajoute un axe secondaire pour la rugosité
axis(side = 4,at= seq(0,1,0.1),labels = seq(1,3,0.2), )
mtext("rugosité", side = 4, line = 2, col = "black", cex = 1)
#on affiche les différentes lignes
lines(seq(0,tmax,length.out = length(vecM)),vecM, col="blue")
lines(seq(0,tmax,length.out = length(vecP)),vecP, col="green")
lines(seq(0,tmax,length.out = length(vecR)),(vecR-1)/2, col="orange")
#on ajoute une légende
legend("topright", legend = c("corail", "macroalgues","poissons","rugosité"),
      col = c("red","blue","green","orange"), lty = c(1, 1),
      lwd = 1.75, bg = "white",cex = 0.65)
}
#on affiche le résultat final du couvert de corail ainsi que de la rugosité
return(c(tail(vecC,1),tail(vecR,1)))
}

#exemple
par(mfrow=c(1,1),mar=c(4,4.5,2,4))
corailstochastique(R0=2.2, f= 0.5, lambda = 1/15,impact = 2,dt=0.1,graph = T)

```



```
## [1] 0.5585409 1.8257135
```

On peut ensuite construire les graphiques du couvert de corail final moyen ainsi que l'écart-type pour un éventail de rugosité initiale entre 1 et 3 et d'effort de pêche entre 0 et 1. La fonction utilisée pour cela est la suivante:

```

graph.imageC <- function(impact,freq,it=10,pas=0.1){
  #on initie une matrice pour Les moyennes et une autre pour Les écarts-types
  #pour des images de 21 pixels de hauteur et 26 de largeur
  matC <- matrix(0, nrow = 21,ncol = 26)
  matsd <- matrix(0, nrow = 21,ncol = 26)

  #on fixe Les variables constantes
  imp<-impact
  l<-freq
  #Les boucles suivantes font essayer différentes valeurs de R0 et de f
  for (i in 1:21) {
    for (j in 1:26){
      #on amorce un vecteur pour contenir les résultats de chaque réplikat
      res <- vector(length = 0)
      #la boucle pour it nombre de réplikat
      for (z in 1:it) {
        #on calcule R0 et f
        R1 <- i*0.1+0.9
        f0 <- j*0.04-0.04
        #le résultat pour le couvert de corail est [1]
        w <- corailstochastique(R0=R1,f=f0, lambda = 1,impact = imp,dt=pas, graph = F)[1]
        res<-c(res,w)
      }
      #on entre la moyenne et l'écart-type de la combinaison dans les matrices correspondantes
      matC[i,j]<-mean(res)
      matsd[i,j]<-sd(res)
    }
  }

  #on fixe Les valeurs pour les axes
  x_values <- seq(0, 1, length.out = ncol(matC))
  y_values <- seq(1, 3, length.out = nrow(matC))

  #on affiche les images
  par(mfrow=c(1,2),mar=c(4,4.5,3,5))
  image.plot(x = x_values, y = y_values, t(matC), col = viridis(20),
             xlab = "effort de pêche", ylab = "Rugosité initiale",
             main=c("moyenne de C finale",paste(c("fréq:1/",1/1,"", impact:""),imp),collapse =
"")))
  image.plot(x = x_values, y = y_values, t(matsd), col = viridis(20),
             xlab = "effort de pêche", ylab = "Rugosité initiale",
             main=c("Écart-type de C finale",paste(c("fréq:1/",1/1,"", impact:""),imp),collapse =
"")))
}

```

Idem pour la moyenne ainsi que l'écart-type de la rugosité. La fonction utilisée pour cela est la suivante (ce sont les mêmes étapes que pour graph.imageC, seulement avec [2] pour obtenir la rugosité finale pour corailstochastique() , les étapes ne sont donc pas commentées) :

```

graph.imageR <- function(impact,freq,it=10,pas=0.1, graph=T, max=F){

  matC <- matrix(0, nrow = 21,ncol = 26)
  matsd <- matrix(0, nrow = 21,ncol = 26)

  imp<-impact
  l<-freq
  for (i in 1:21) {
    for (j in 1:26){
      res <- vector(length = 0)
      for (z in 1:it) {
        R1 <- i*0.1+0.9
        f0 <- j*0.04-0.04
        w <- corailstochastique(R0=R1,f=f0, lambda = 1,impact = imp,dt=pas, graph = F)[2]
        res<-c(res,w)
      }
      matC[i,j]<-mean(res)
      matsd[i,j]<-sd(res)
    }
  }
  #si on veut afficher les images
  if (graph==TRUE){
    x_values <- seq(0, 1, length.out = ncol(matC))
    y_values <- seq(1, 3, length.out = nrow(matC))
    # Plot the matrix as an image with different colored pixels

    par(mfrow=c(1,2),mar=c(4,4.5,3,5))
    image.plot(x = x_values, y = y_values, t(matC), col = viridis(20),
               xlab = "effort de pêche", ylab = "Rugosité initiale",
               main=c("moyenne de R finale",paste(c("fréq:1/",1/1,"", impact:""),imp),
                     collapse = "")))
    image.plot(x = x_values, y = y_values, t(matsd), col = viridis(20),
               xlab = "effort de pêche", ylab = "Rugosité initiale",
               main=c("Écart-type de R finale",paste(c("fréq:1/",1/1,"", impact:""),imp),
                     collapse = "")))
  }
  #si on veut afficher la moyenne
  if (max==T){
    print(max(matC))
  }
}

```

Résultat :

Dans la figure 1, on représente les zones d'instabilités entre les populations de macroalgue et le corail. Ainsi, pour chaque rugosité fixe, on regarde pour chaque effort de pêche s'il y a une dominance du corail ou une dominance des macroalgues ou aucune domination. Cette zone qui n'a aucune domination représente la limite de l'effort de pêche pour une rugosité donner.

```

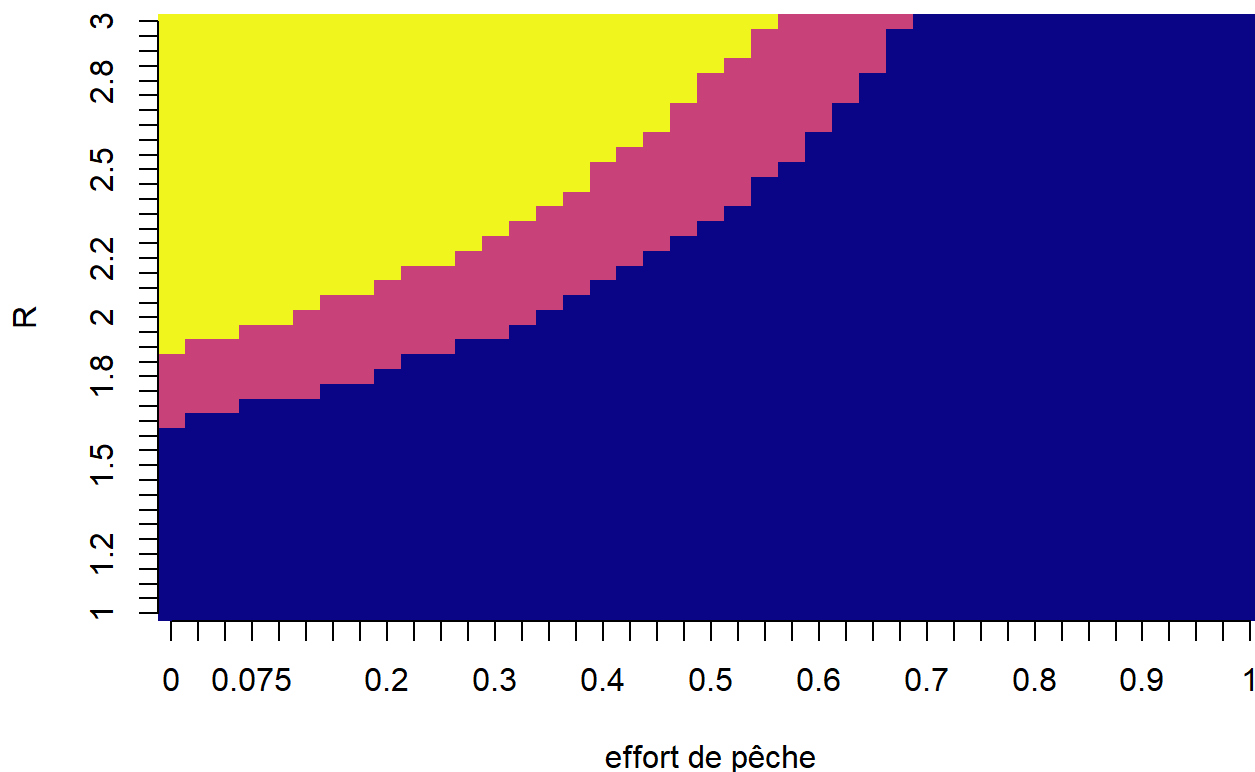
# Affichage pour figure 1
# Définition des noms de lignes et de colonnes
row_names <- paste(seq(1, 3, by = (2 / 40)))
col_names <- paste(seq(0, 1, by = (1 / 40)))

# Attribution des nom de ligne et de colonnes
row.names(coral) <- row_names
colnames(coral) <- col_names

# Créer Le graphique avec La matrice en tant que données
image(1:nrow(coral), 1:ncol(coral), t(coral), col = plasma(40),
      xlab = "effort de pêche", ylab = "R", main = "Graphique de C finale", axes=F);axis(side =
1, at = 1:ncol(coral), labels = col_names);axis(side = 2, at = 1:nrow(coral), labels = row_name
s)

```

Graphique de C finale

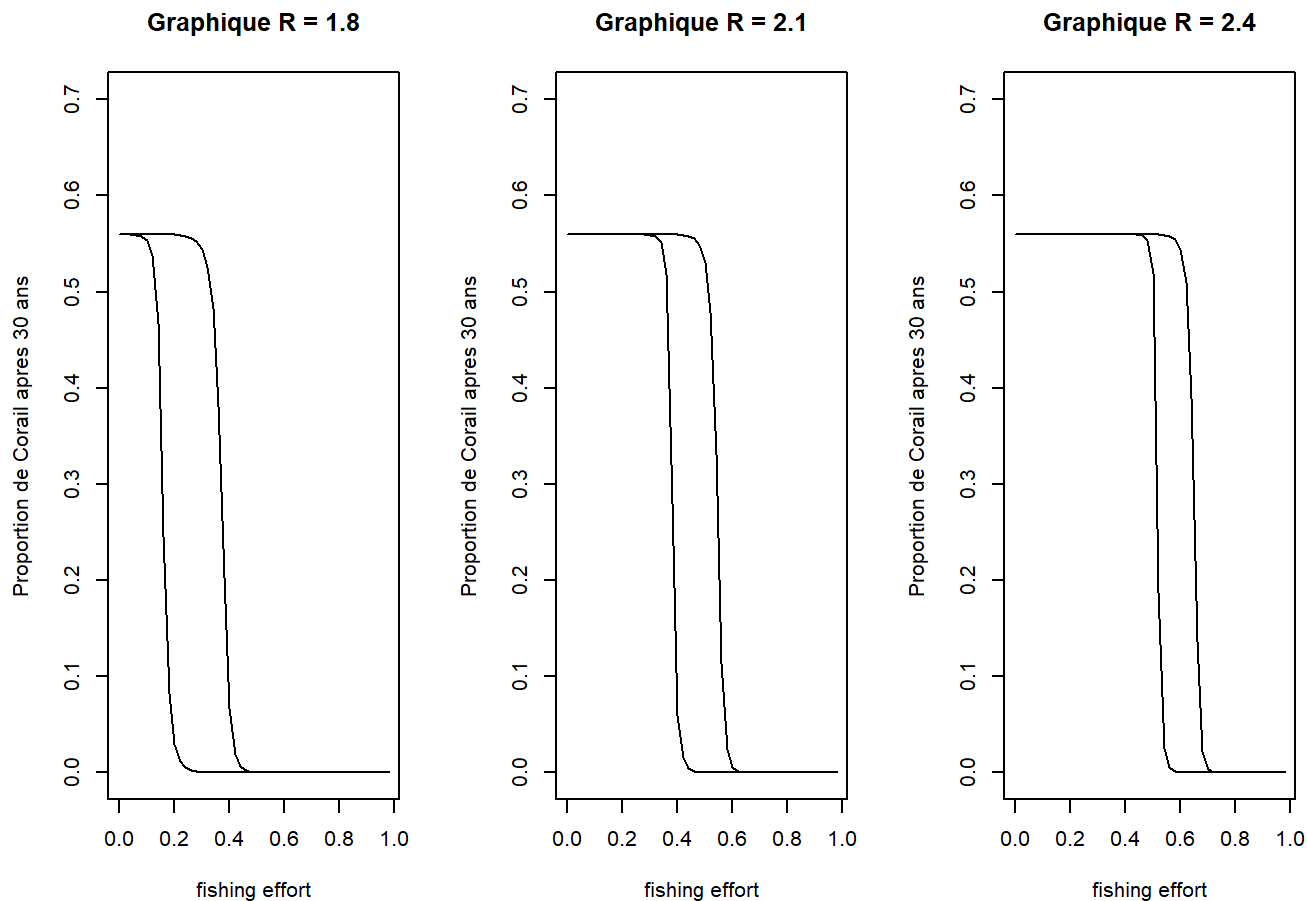


Dans la figure 2, affichage des graphiques des valeurs d'équilibre après 30 ans de la couverture corallienne en fonction de l'effort de pêche par rapport au taux de croissance des poissons-perroquets (f) pour différentes valeurs de rugosité (R) afin de démontrer les implications de l'effort de pêche sur la couverture des récifs coralliens.

```
# Affichage pour figure 2
par(mfrow=c(1,3))
plot(x = fish.vec[,1], y = fish.vec[,2],type = "l",ylim = c(0,0.7),xlab = "fishing effort", ylab = "Proportion de Corail apres 30 ans", main = paste("Graphique R =", rug.vec[1]))
lines(x = fish.vec[,1], y = fish.vec[,3])

plot(x = fish.vec[,1], y = fish.vec[,5],type = "l",ylim = c(0,0.7),xlab = "fishing effort", ylab = "Proportion de Corail apres 30 ans", main = paste("Graphique R =", rug.vec[2]))
lines(x = fish.vec[,1], y = fish.vec[,6])

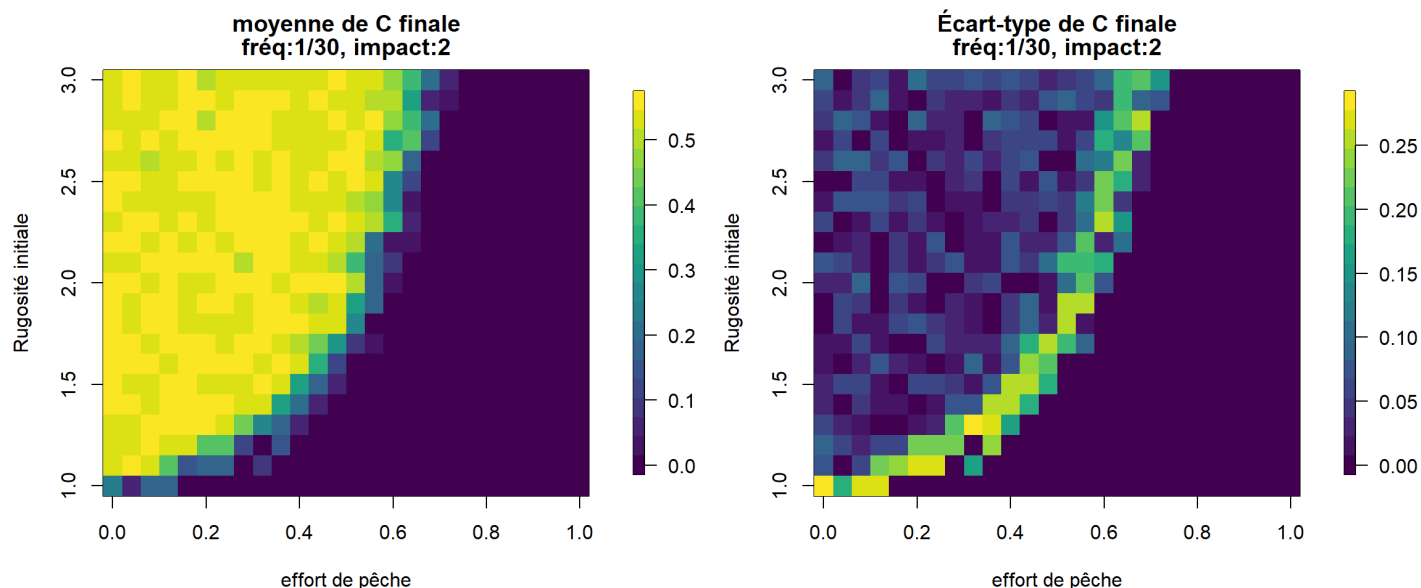
plot(x = fish.vec[,1], y = fish.vec[,8],type = "l",ylim = c(0,0.7),xlab = "fishing effort", ylab = "Proportion de Corail apres 30 ans", main = paste("Graphique R =", rug.vec[3]))
lines(x = fish.vec[,1], y = fish.vec[,9])
```



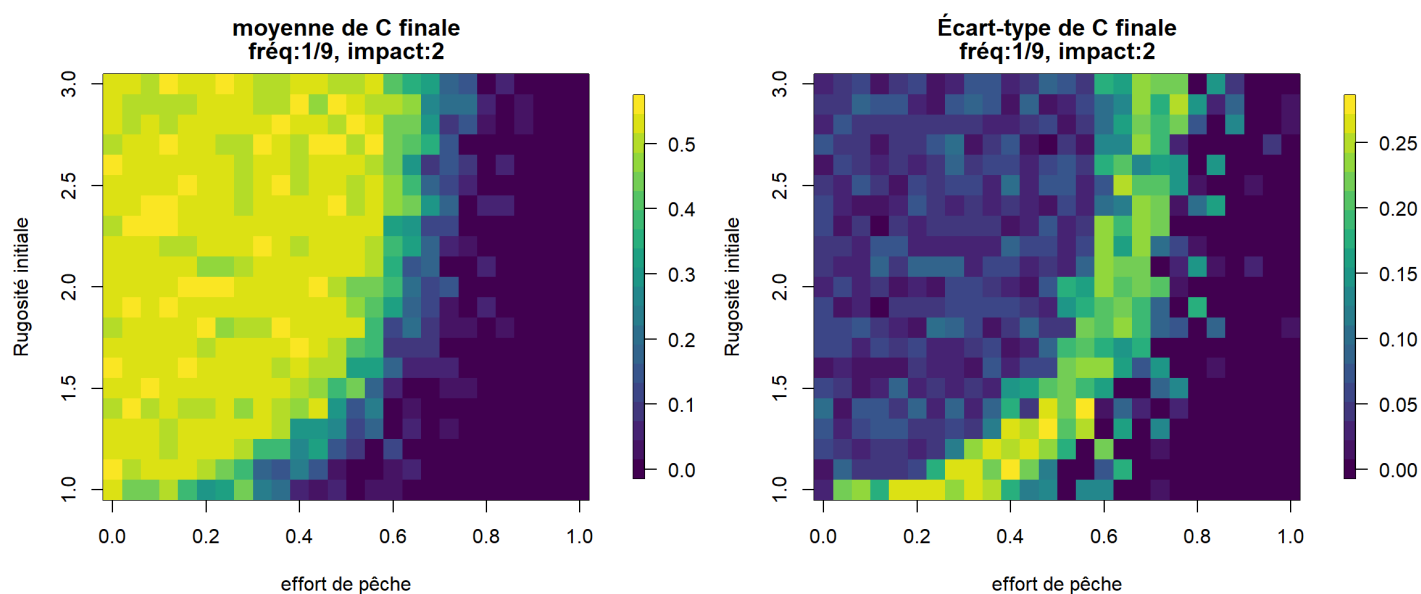
```
par(mfrow=c(1,1))
```

On peut ainsi visualiser le résultat pour les 2 situations suivantes, par exemple: la simulation avec ouragans à impacts modérés (2) d'une fréquence faible (30 ans) et la simulation avec ouragans à impacts modérés (2) d'une fréquence élevée (9 ans):

```
graph.imageC(2,1/30,10,0.1)
```



```
graph.imageC(2,1/9,10,0.1)
```



On peut ensuite bâtir un graphique avec la valeur maximale de rugosité finale pour chacune des 9 simulations possibles d'impact et de fréquence variés:

```
rugfin<-as.data.frame(matrix(0,nrow = 3, ncol = 3))
colnames(rugfin)<-c("1/9 ans", "1/15 ans", "1/30 ans")
rownames(rugfin)<-c(1,2,3)

rugfin[,1]<-c(graph.imageR(1,1/9,5,0.1,F,T),
              graph.imageR(2,1/9,5,0.1,F,T),
              graph.imageR(3,1/9,5,0.1,F,T))
```

```
## [1] 2.404864
## [1] 1.859437
## [1] 1.727546
```

```
rugfin[,2]<-c(graph.imageR(1,1/15,5,0.1,F,T),
             graph.imageR(2,1/15,5,0.1,F,T),
             graph.imageR(3,1/15,5,0.1,F,T))
```

```
## [1] 2.506755
## [1] 2.084915
## [1] 1.85181
```

```
rugfin[,3]<-c(graph.imageR(1,1/30,5,0.1,F,T),
             graph.imageR(2,1/30,5,0.1,F,T),
             graph.imageR(3,1/30,5,0.1,F,T))
```

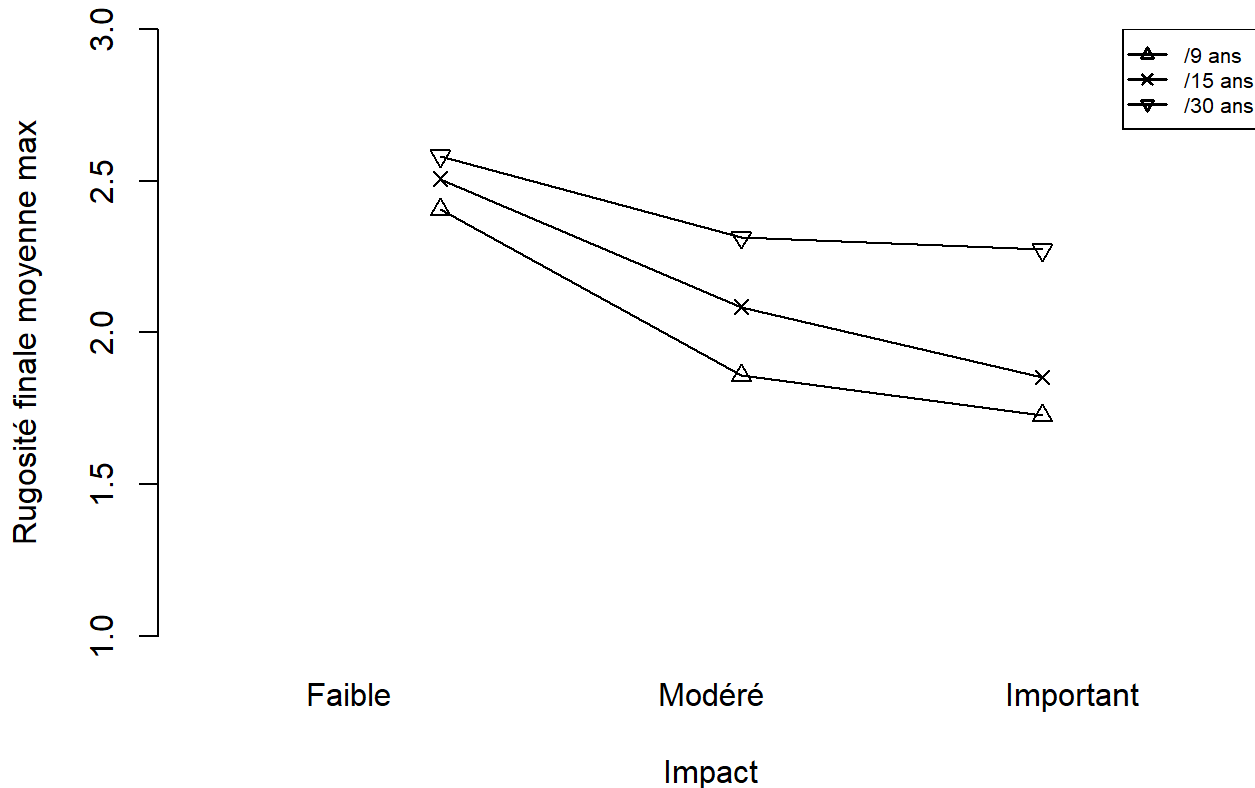
```
## [1] 2.580961
## [1] 2.313574
## [1] 2.273326
```

```
# Définir les catégories
categories <- c("Faible", "Modéré", "Important")

# Créer un diagramme vide
barplot(rep(0, length(categories)), names.arg = categories, ylim = c(1,3),
        xlab = "Impact", ylab = "Rugosité finale moyenne max", main = "")

# Ajout des points et lignes sur le diagramme
points(rep(1:length(categories), each = 1), rugfin[,1],
       pch = 2, col = "black")
points(rep(1:length(categories), each = 1), rugfin[,2],
       pch = 4, col = "black")
points(rep(1:length(categories), each = 1), rugfin[,3],
       pch = 6, col = "black")
lines(rep(1:length(categories), each = 1), rugfin[,1],
      pch = 2, col = "black")
lines(rep(1:length(categories), each = 1), rugfin[,2],
      pch = 4, col = "black")
lines(rep(1:length(categories), each = 1), rugfin[,3],
      pch = 6, col = "black")

#on ajoute la légende
legend("topright", legend = c("/9 ans", "/15 ans", "/30 ans"),
      col = c("black", "black", "black"), pch = c(2,4,6), lty = c(1, 1),
      lwd = 1.5, bg = "white", cex = 0.65)
```

Interprétation :

Après analyse des résultats, on remarque facilement que la pêche est le facteur qui a l'effet le plus clair sur le corail, réduisant grandement la possibilité que le corail se rétablisse. Il semble que le couvert de corail soit légèrement moins résilient à la pêche quand les ouragans sont moins fréquents et de faible intensité, mais cette tendance s'inverse quand les impacts sont modérés ou importants. La rugosité, elle, arrive aussi, semble supporter de plus grands niveaux de pêche sans s'effondrer quand les ouragans sont plus fréquents quand l'impact est faible, bien que cette tendance semble s'estomper quand l'impact augmente. Toutefois, quand les ouragans sont moins fréquents et violents et que l'effort de pêche est assez bas, la rugosité et le couvert de corail se rétablissent à des niveaux plus hauts. Ces résultats pointent vers l'importance de considérer l'application de mesures de restriction à la pêche dans les zones où les ouragans sont moins fréquents et/ou plus violents, car le corail est plus fragile dans ces endroits et, car le gain d'une petite réduction de l'effort de pêche peut permettre une amélioration importante de l'état du corail, donc une meilleure efficacité de conservation.