

Concepts de base en R

Sophie Baillargeon, Université Laval

2020-01-13

Table des matières

R = une puissante calculatrice.	1
Comment garder une copie en mémoire d'un résultat ?	2
Quels noms sont acceptés en R ?	2
Comment accéder à un résultat gardé en mémoire dans un objet ?	2
Est-ce le seul objet accessible ?	3
Qu'est-ce qu'une fonction R ?	5
Comment écrire un appel de fonction R ?	5
Comment sont interprétées les valeurs d'arguments non assignées à un nom ?	6
L'argument . . . et ses deux utilités.	7
Les opérateurs sont aussi des fonctions.	9
Comment utiliser une fonction d'ajustement de modèle ?	9
Qu'est-ce qu'un package ?	11
Comment utiliser un package ?	11
Comment obtenir de l'information ?	12
Comment obtenir de l'information sur une fonction ?	12
Comment dénicher une fonction pour réaliser une certaine tâche ?	12
Comment faire un graphique ?	13
Est-ce que de la programmation orientée objet est possible en R ?	14
Comment conserver une trace des commandes soumises au cours d'une session R ?	15
Comment quitter R ?	15
Qu'est-ce que le répertoire de travail ?	16
Comment charger un fichier d'extension <code>.RData</code> ?	16
Pourquoi créer des programmes R plutôt que de travailler directement dans la console ?	16
Quel outil utiliser pour éditer un programme R ?	17
Caractéristiques de RStudio	17
Quelles sont les règles de syntaxe du langage R ?	18
Comment connaître et modifier les paramètres d'une session R ?	19
Où trouver plus d'information ?	20

R = une puissante calculatrice.

R est un langage interactif. La console de R est un peu comme une calculatrice.

```
1 + 1
```

```
## [1] 2
```

```
2*5 + 1
```

```
## [1] 11
```

Comment garder une copie en mémoire d'un résultat ?

Il faut **assigner** le résultat à un **nom** :

```
a <- 1 + 1
```

- <- est l'opérateur d'assignation,
- a est le nom (ou le symbole) référant à l'objet créé en mémoire,
- 1 + 1 est l'expression générant le résultat à enregistrer,
- 2 est la valeur contenue dans l'objet créé.

Notons que = est aussi un opérateur d'assignation. Cet opérateur est utilisé en R pour assigner une valeur à un argument lors de l'appel d'une fonction. Cependant, pour l'assignation d'une valeur à un nom d'objet, la pratique la plus recommandée en programmation R est d'utiliser <- plutôt que =. J'expliquerai plus tard la différence entre <- et =, qui est trop technique pour un premier cours.

Quels noms sont acceptés en R ?

Un nom d'objet R doit respecter les règles suivantes¹.

- Le nom d'un objet peut uniquement contenir des lettres, des chiffres, des points ou des barres de soulignement.
- Il commence obligatoirement par une lettre ou un point. S'il commence par un point, le deuxième caractère ne doit pas être un chiffre.
- Il ne doit pas être un des mots suivants, qui sont réservés par R² : if, else, repeat, while, function, for, in, next, break, TRUE, FALSE, NULL, Inf, NaN, NA, NA_integer_, NA_real_, NA_complex_, NA_character_, ... et ..1, ..2, etc.

Remarques :

- Les lettres accentuées sont acceptées, mais il vaut mieux les éviter, car leur transfert d'un système d'exploitation à un autre est souvent problématique.
- Il n'y a aucune restriction sur la longueur des noms.
- Si vous tentez de créer un objet portant un nom qui ne respecte pas une des règles précédentes, une erreur sera générée.

Comment accéder à un résultat gardé en mémoire dans un objet ?

Dans la console, il suffit de taper le nom référant à l'objet :

```
a
```

```
## [1] 2
```

mais pas :

```
"a"
```

```
## [1] "a"
```

car les guillemets servent à créer des chaînes de caractères.

De plus, il faut **respecter la casse** car R différencie les majuscules et les minuscules. Donc A n'est pas le même symbole que a en R.

¹<https://stat.ethz.ch/R-manual/R-patched/library/base/html/make.names.html>

²<https://stat.ethz.ch/R-manual/R-patched/library/base/html/Reserved.html>

Soumettre une commande R contenant uniquement le nom d'un objet est équivalent à soumettre un appel à la fonction `print` en fournissant cet objet comme premier argument. Ainsi, les commandes suivantes sont équivalentes :

```
a

## [1] 2

print(a)

## [1] 2
```

Est-ce le seul objet accessible ?

La commande `ls()` (équivalente à `objects()`) retourne la liste des noms des objets, dans l'**environnement de travail** (en anglais *workspace*), parfois appelé environnement courant ou environnement global. Il s'agit de la liste des noms des objets créés depuis le démarrage de la session R (et jamais effacés).

```
ls()

## [1] "a"
```

Ces noms sont ici entre guillemets, car ils sont affichés par `ls` en tant que chaînes de caractères.

Mais est-ce vraiment le seul objet accessible ?

Non. En plus des objets que vous avez créés, vous avez accès aux objets venant avec l'installation de R. Ils sont simplement rangés ailleurs que dans l'environnement de travail. Voici la liste de tous les *groupes* d'objets auxquels vous avez accès directement.

```
search()

## [1] ".GlobalEnv"      "package:stats"    "package:graphics"
## [4] "package:grDevices" "package:utils"    "package:datasets"
## [7] "package:methods" "Autoloads"        "package:base"
```

Ces groupes d'objets portent le nom d'**environnements**. Il s'agit pour la plupart d'environnements de packages. Le premier environnement de cette liste, nommé `".GlobalEnv"`, est votre environnement de travail. La fonction `ls` affiche par défaut le contenu de cet environnement, mais elle peut afficher le contenu de n'importe quel environnement grâce à l'argument `name`.

```
ls(name = "package:stats")

## [1] "acf"              "acf2AR"           "add.scope"
## [4] "add1"             "addmargins"       "aggregate"
## [7] "aggregate.data.frame" "aggregate.ts"      "AIC"
## [10] "alias"            "anova"            "ansari.test"
## [13] "aov"              "approx"           "approxfun"
## [ reached getOption("max.print") -- omitted 433 entries ]
```

Quelle est la nature de tous ces objets ?

Il s'agit principalement de fonctions et de jeux de données. Par exemple l'environnement du package `base` contient la fonction suivante :

```
casefold
```

```
## function (x, upper = FALSE)
## if (upper) toupper(x) else tolower(x)
## <bytecode: 0x000000001281f2a0>
## <environment: namespace:base>
```

Cette fonction sert à convertir la casse de caractères alphabétiques dans une ou plusieurs chaînes de caractères, réunies dans un vecteur³. La casse d'un caractère alphabétique, soit d'une lettre, est sa forme majuscule (capitale) ou minuscule. En anglais, les majuscules sont appelées *upper case characters* et les minuscules *lower case characters*.

L'environnement du package `base` contient aussi le jeu de données suivant :

```
women
```

```
##      height weight
## 1         58     115
## 2         59     117
## 3         60     120
## 4         61     123
## 5         62     126
## 6         63     129
## 7         64     132
## 8         65     135
## 9         66     139
## 10        67     142
## 11        68     146
## 12        69     150
## 13        70     154
## 14        71     159
## 15        72     164
```

Il s'agit de valeurs moyennes de grandeur et de poids, calculées en 1975, pour des femmes américaines âgées entre 30 et 39 ans⁴.

Astuce : Utilisez la fonction `str` pour avoir un aperçu d'un objet plutôt que de l'afficher en entier.

```
str(casefold)
```

```
## function (x, upper = FALSE)
```

```
str(women)
```

```
## 'data.frame':   15 obs. of  2 variables:
## $ height: num  58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 ...
## $ weight: num  115 117 120 123 126 129 132 135 139 142 ...
```

Ainsi, si l'objet est de grande taille, vous ne surchargerez pas la console en affichant la totalité de son contenu.

³<https://stat.ethz.ch/R-manual/R-patched/library/base/html/charttr.html>

⁴<https://stat.ethz.ch/R-manual/R-patched/library/datasets/html/women.html>

Qu'est-ce qu'une fonction R ?

Une fonction R est, comme dans tout langage informatique, un bout de code qui produit un certain résultat lorsqu'exécuté. Pour exécuter le code composant une fonction, celle-ci doit être *appelée*. Lorsqu'elle est appelée, la fonction prend des valeurs en entrée, qui sont assignées à des *arguments*. Le code de la fonction réfère à ces arguments de façon à ce que l'appel de la fonction provoque un traitement des valeurs fournies en entrée. En bout de ligne, la fonction génère un résultat, qui est la plupart du temps *retourné* dans un objet en sortie. Ce résultat peut aussi être un *effet de bord*⁵ tel que la production d'un graphique, l'écriture dans un fichier externe, la modification d'un paramètre de la session R, etc.



FIGURE 1 – Représentation schématique de l'exécution d'un appel à une fonction R

Un objet R de type fonction est composé des éléments suivants.

- Une liste d'arguments, avec leurs valeurs par défaut s'il y a lieu. Exemple :

```
args(casefold)
```

```
## function (x, upper = FALSE)  
## NULL
```

La fonction `casefold` possède deux arguments : `x` et `upper`. L'argument `x` n'a pas de valeur par défaut, mais `upper` a `FALSE` comme valeur par défaut.

- Le corps de la fonction, soit le code composant la fonction. Exemple :

```
body(casefold)
```

```
## if (upper) toupper(x) else tolower(x)
```

Le corps de la fonction `casefold` est particulièrement court. Le plus souvent, le corps d'une fonction R se compose de plus d'une instruction.

Pour utiliser une fonction, il faut l'appeler en lui fournissant, au besoin, des valeurs aux arguments. Exemple :

```
casefold(x = c("Bonjour", "à", "tous!"), upper = TRUE)
```

```
## [1] "BONJOUR" "À" "TOUS!"
```

Comment écrire un appel de fonction R ?

Un appel de fonction est une instruction formée des éléments suivants, en respectant cet ordre :

1. le nom de la fonction à appeler ;
2. une parenthèse ouvrante (;
3. au besoin, des valeurs pour les arguments, spécifiées ainsi (et séparés par une virgule si plus d'une valeur d'argument est à donner en entrée) :
 - a) nom de l'argument, suivi de l'opérateur = (éléments non obligatoires),
 - b) commande générant la valeur à fournir en argument (souvent simplement le nom d'un objet) ;
4. une parenthèse fermante).

⁵[https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_de_bord_\(informatique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_de_bord_(informatique))

Dans l'exemple précédent, c'est-à-dire :

```
casefold(x = c("Bonjour", "à", "tous!"), upper = TRUE)
```

deux valeurs d'arguments sont fournies, en spécifiant les noms des arguments. Le résultat suivant est obtenu :

```
## [1] "BONJOUR" "À"      "TOUS!"
```

Ici, la valeur par défaut de l'argument `upper` est `FALSE`. Pour utiliser cette valeur, il n'est pas nécessaire de fournir de valeur à l'argument dans l'appel de fonction.

```
casefold(x = c("Bonjour", "à", "tous!"))
```

```
## [1] "bonjour" "à"      "tous!"
```

Cependant, l'argument `x` n'a pas de valeur par défaut et ne lui fournir aucune valeur génère une erreur.

```
casefold()
```

```
## Error in tolower(x): argument "x" is missing, with no default
```

Comment sont interprétées les valeurs d'arguments non assignées à un nom ?

Si une valeur d'argument est passée en entrée sans être spécifiquement assignée à un nom, la valeur est assignée au premier argument non spécifié, en respectant l'ordre des arguments dans la définition de la fonction. Voici quelques exemples et les résultats obtenus.

```
casefold(c("Bonjour", "à", "tous!"))
```

```
## [1] "bonjour" "à"      "tous!"
```

Ici, la valeur `c("Bonjour", "à", "tous!")` n'est pas assignée explicitement à un nom par l'utilisateur. R l'assigne implicitement au premier argument, soit `x`.

```
casefold(c("Bonjour", "à", "tous!"), TRUE)
```

```
## [1] "BONJOUR" "À"      "TOUS!"
```

Ici, les deux valeurs fournies en entrée ne sont pas assignées explicitement à des noms par l'utilisateur. Elles sont donc assignées implicitement en respectant l'ordre des arguments : la première valeur fournie, soit `"Bonjour", "à", "tous!"` est assignée au premier argument, soit `x` ; la deuxième valeur fournie, soit `TRUE` est assignée au deuxième argument, soit `upper`.

```
casefold(FALSE, c("Bonjour", "à", "tous!"))
```

```
## Warning in if (upper) toupper(x) else tolower(x): the condition has length > 1
## and only the first element will be used
```

```
## Error in if (upper) toupper(x) else tolower(x): argument is not interpretable as logical
```

Ici, l'ordre dans lequel les valeurs sont fournies implique que `FALSE` est assigné à `x` et `c("Bonjour", "à", "tous!")` est assigné à `upper`. Cela génère un avertissement et une erreur, car les arguments reçoivent alors des valeurs qui ne sont pas des types attendus.

```
casefold(FALSE, x = c("Bonjour", "à", "tous!"))
```

```
## [1] "bonjour" "à"      "tous!"
```

Si la valeur `c("Bonjour", "à", "tous!")` est explicitement assignée à l'argument `x`, la valeur `FALSE` est implicitement assignée à `upper`, même si elle est fournie en première position, car les assignations explicites ont préséance sur les assignations implicites.

Astuce : Pour éviter les erreurs dans un appel de fonction, il vaut mieux toujours assigner les valeurs passées en entrée à des noms d'arguments. Par contre, dans la pratique, lorsque le premier argument d'une fonction R est un objet contenant des données sur lesquelles appliquer un calcul (ce qui est fréquent en R), il est habituel de ne pas le nommer. Ainsi, dans l'exemple initial, l'appel le plus usuel est le suivant :

```
casefold(c("Bonjour", "à", "tous!"), upper = TRUE)
```

L'argument ... et ses deux utilités.

Certaines fonctions R possèdent un argument nommé « ... ». C'est le cas par exemple de la fonction `paste`, servant à concaténer des valeurs, préalablement converties en chaînes de caractères.

```
args(paste)
```

```
## function (..., sep = " ", collapse = NULL)
## NULL
```

C'est aussi le cas de la fonction `apply`, servant à appliquer un calcul sur des sous-sections d'un objet.

```
args(apply)
```

```
## function (X, MARGIN, FUN, ...)
## NULL
```

L'argument ... n'a pas la même utilité dans ces deux fonctions. Je vais utiliser ces deux exemples de fonction pour illustrer les deux utilités potentielles de ...

Utilité 1 : recevoir un nombre indéterminé d'arguments

La première utilité de ... est de permettre à une fonction de recevoir en entrée un nombre indéterminé d'arguments. Si ... est placé au tout début de la liste des arguments, il a typiquement cette utilité. C'est le cas pour la fonction `paste`. Cette fonction peut concaténer les valeurs provenant d'autant d'objets que désiré grâce à l'argument Voici des exemples.

```
paste("a", 1:4, sep = "-")
```

```
## [1] "a-1" "a-2" "a-3" "a-4"
```

```
paste("a", 1:4, c(TRUE, FALSE), collapse = " ")
```

```
## [1] "a 1 TRUE a 2 FALSE a 3 TRUE a 4 FALSE"
```

Astuce : Les arguments « attrapés » par ... peuvent être assignés à des noms, tant que ceux-ci diffèrent des noms des autres arguments de la fonction. Dans un appel à la fonction `paste`, nommer les arguments attrapés par ... n'a aucun impact.

```
paste(lettre = "a", chiffre = 1:4, sep = "-")
```

```
## [1] "a-1" "a-2" "a-3" "a-4"
```

Cependant, avec d'autres fonctions, de telles assignations ont pour effet de nommer des éléments dans le résultat. Voici un exemple avec la fonction `list`.

```
args(list)
```

```
## function (...)  
## NULL
```

```
# Appel à la fonction list sans assignation des arguments à des noms  
list("a", 1:4)
```

```
## [[1]]  
## [1] "a"  
##  
## [[2]]  
## [1] 1 2 3 4
```

```
# Appel à la fonction list avec assignation des arguments à des noms  
list(lettre = "a", chiffre = 1:4)
```

```
## $lettre  
## [1] "a"  
##  
## $chiffre  
## [1] 1 2 3 4
```

Utilité 2 : passer des arguments à une autre fonction

La deuxième utilité de l'argument `...` est de passer des arguments à une autre fonction appelée dans le corps de la première fonction. Si `...` est placé à la fin de la liste des arguments, il a typiquement cette utilité.

Considérons par exemple la fonction `apply`.

```
args(apply)
```

```
## function (X, MARGIN, FUN, ...)  
## NULL
```

Supposons que cette fonction soit utilisée pour calculer la moyenne des valeurs par colonne dans le jeu de données `women`.

```
apply(X = women, MARGIN = 2, FUN = mean)
```

```
## height weight  
## 65.0000 136.7333
```

Cet appel à la fonction `apply` provoque des appels à la fonction fournie comme argument `FUN`, ici la fonction `mean`. Pour demander le calcul de moyennes tronquées via l'argument `trim` de la fonction `mean`, il suffit d'ajouter cet argument, et sa valeur désirée, dans l'appel à la fonction `apply`.

```
apply(X = women, MARGIN = 2, FUN = mean, trim = 0.3)
```

```
## height weight  
## 65.0000 135.5714
```

Ici, l'argument portant un nom autre que `X`, `MARGIN` et `FUN` (les trois arguments nommés dans la liste des

arguments de `apply`), soit l'argument `trim`, a été inclus automatiquement dans les sous-appels à la fonction `mean`.

Il est possible de passer à la sous-fonction autant d'arguments que désiré. Pour éviter toute erreur, il vaut mieux toujours assigner des noms aux valeurs passées en argument à une sous-fonction via `...`.

Les opérateurs sont aussi des fonctions.

Tous les opérateurs sont aussi des fonctions. Par exemple, l'opérateur mathématique d'addition :

```
1 + 1
```

est en fait un raccourci pour la fonction nommée `'+'` :

```
'+'(1, 1)
```

Comment utiliser une fonction d'ajustement de modèle ?

Étant donné que R est un langage conçu pour effectuer des calculs statistiques et créer des graphiques, il sert fréquemment à ajuster des modèles statistiques. R possède une classe d'objets particulière dédiée à la spécification de modèles : les **formules**. Comprendre comment utiliser une fonction d'ajustement de modèle en R revient principalement à comprendre comment correctement spécifier une formule R.

Par exemple, la fonction `lm` sert à ajuster un modèle linéaire. Le premier argument de cette fonction est une formule. Voici un exemple d'ajustement d'une régression linéaire simple sur les données `women`, en utilisant le poids comme variable réponse et la grandeur comme variable explicative.

```
reg <- lm(weight ~ height, data = women)
```

L'objet `weight ~ height` est une formule.

```
str(weight ~ height)
```

```
## Class 'formula' language weight ~ height
##   .. attr(*, ".Environment")=<environment: R_GlobalEnv>
```

La partie de gauche de la formule (à gauche du `~`) contient la ou, plus rarement, les noms des variables réponse. La partie de droite contient pour sa part le ou les noms des variables explicatives. Ces noms sont accompagnés, au besoin, d'opérateurs et de fonctions pour désigner comment former les termes du modèle à partir des variables explicatives. Par exemple, voici la formule à utiliser dans l'appel à la fonction `lm` pour effectuer une régression polynomiale de degré deux avec les données `women`.

```
reg_poly <- lm(weight ~ height + I(height^2), data = women)
```

Je n'irai pas plus loin dans la présentation des formules R ici. L'écriture de formule est un sujet qui sera couvert dans un prochain cours.

Comment accéder aux résultats de la fonction d'ajustement de modèle ?

Un objet obtenu en sortie d'une fonction d'ajustement de modèle contient beaucoup plus d'informations qu'il ne le laisse paraître à première vue.

Par exemple, affichons dans la console l'objet `reg` créé dans le premier exemple d'ajustement de modèle.

```
reg
```

```
##
## Call:
## lm(formula = weight ~ height, data = women)
##
## Coefficients:
## (Intercept)      height
##      -87.52         3.45
```

Seul un court extrait des résultats contenus dans `reg` est imprimé. Un résumé plus complet des résultats est obtenu avec la fonction `summary`.

```
summary(reg)
```

```
##
## Call:
## lm(formula = weight ~ height, data = women)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -1.7333 -1.1333 -0.3833  0.7417  3.1167
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept) -87.51667     5.93694  -14.74 1.71e-09 ***
## height       3.45000     0.09114   37.85 1.09e-14 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 1.525 on 13 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.991, Adjusted R-squared:  0.9903
## F-statistic: 1433 on 1 and 13 DF, p-value: 1.091e-14
```

Cependant, en réalité, l'objet `reg` contient plus d'éléments que ce qui est affiché ci-dessus.

L'objet `reg` est une liste de sous-objets contenant les résultats de l'ajustement du modèle :

```
str(reg, max.level = 1, give.attr = FALSE)
```

```
## List of 12
## $ coefficients : Named num [1:2] -87.52 3.45
## $ residuals    : Named num [1:15] 2.4167 0.9667 0.5167 0.0667 -0.3833 ...
## $ effects      : Named num [1:15] -529.566 57.73 -0.058 -0.486 -0.914 ...
## $ rank         : int 2
## $ fitted.values: Named num [1:15] 113 116 119 123 126 ...
## $ assign       : int [1:2] 0 1
## $ qr           :List of 5
## $ df.residual  : int 13
## $ xlevels      : Named list()
## $ call         : language lm(formula = weight ~ height, data = women)
## $ terms       :Classes 'terms', 'formula' language weight ~ height
## $ model        :'data.frame':  15 obs. of  2 variables:
```

Un élément de la liste `reg` peut être extrait avec l'opérateur `$` comme suit :

```
reg$coefficients
```

```
## (Intercept)      height
##   -87.51667      3.45000
```

Cependant, il existe des fonctions servant spécifiquement à extraire des éléments d'une sortie de modèle. Par exemple, la fonction `coefficients` extrait les coefficients du modèle :

```
coefficients(reg)
```

```
## (Intercept)      height
##   -87.51667      3.45000
```

La fonction `summary`, en plus d'afficher un résumé des résultats tel que vu précédemment, retourne en sortie une liste contenant quelques résultats complémentaires à ceux retournés par la fonction d'ajustement du modèle :

```
regSummary <- summary(reg)
str(regSummary, max.level = 1, give.attr = FALSE)
```

```
## List of 11
## $ call      : language lm(formula = weight ~ height, data = women)
## $ terms     :Classes 'terms', 'formula' language weight ~ height
## $ residuals : Named num [1:15] 2.4167 0.9667 0.5167 0.0667 -0.3833 ...
## $ coefficients : num [1:2, 1:4] -87.5167 3.45 5.9369 0.0911 -14.741 ...
## $ aliased    : Named logi [1:2] FALSE FALSE
## $ sigma     : num 1.53
## $ df        : int [1:3] 2 13 2
## $ r.squared  : num 0.991
## $ adj.r.squared: num 0.99
## $ fstatistic : Named num [1:3] 1433 1 13
## $ cov.unscaled : num [1:2, 1:2] 15.15595 -0.23214 -0.23214 0.00357
```

Qu'est-ce qu'un package ?

Un package R est un **regroupement de fonctions et/ou de données documentées**. En fait, lors de l'ouverture d'une session R, en supposant que l'environnement de travail est vide, tous les objets accessibles proviennent d'un package.

L'installation de base de R est composée d'un certain nombre de packages R. Un très grand nombre de packages supplémentaires sont aussi disponibles sur le web. Les packages sont la façon formelle de partager publiquement des fonctions R.

La majorité des développeurs de packages R les rendent disponibles sur le **CRAN** (*Comprehensive R Archive Network*) : <http://www.r-project.org/> > « CRAN » dans le menu de gauche.

Le site web **Bioconductor** (<http://www.bioconductor.org/>) propose aussi beaucoup de packages R spécifiques au domaine de la bio-informatique.

Finalement, certains développeurs distribuent simplement leurs packages R sur leur site web personnel ou sur un site web de gestion de développement de logiciels tel que **GitHub** (<https://github.com/>), **Bitbucket** (<https://bitbucket.org/>) ou **R-Forge** (<https://r-forge.r-project.org/>)

Comment utiliser un package ?

Pour utiliser un package R, il faut premièrement qu'il soit installé. Installer R provoque l'installation de certains packages. Les packages supplémentaires doivent être installés séparément. La [fiche sur l'installation de R](#) explique comment procéder à ces installations.

Ensuite, il faut charger un package dans une session R afin d'avoir accès aux fonctions qu'il contient. Le démarrage d'une session R provoque automatiquement le chargement de certains packages. Par défaut, les packages suivants sont chargés automatiquement : `base`, `methods`, `datasets`, `utils`, `grDevices`, `graphics`, `stats`. Pour charger d'autres packages, il faut utiliser la fonction `library`, comme dans cet exemple :

```
library(dplyr)
```

Comment obtenir de l'information ?

Comment obtenir de l'information sur une fonction ?

Avant d'utiliser une fonction pour la première fois, il est utile de savoir :

- ce que la fonction fait ;
- les utilités de ses arguments et les formats d'objets acceptés comme valeur en argument ;
- le format du résultat en sortie et/ou l'effet de bord produit.

Toutes les fonctions ont une fiche d'aide, toujours structurée de la même façon, procurant ces informations. En R, la fonction `help` (ou l'opérateur `?`) permet d'accéder à cette fiche d'aide, comme dans cet exemple :

```
help(lm)
# ou
?lm
```

Notons que pour ouvrir la fiche d'aide d'un opérateur, il faut encadrer son nom de guillemets simples ou doubles dans l'appel à la fonction `help`, par exemple :

```
help('+')
```

La majorité des fiches d'aide de fonctions R comportent des exemples d'utilisation de la fonction à la fin. Ces exemples sont souvent très utiles pour comprendre comment utiliser la fonction.

Aussi, le CRAN comporte une page web pour chaque package R qu'il héberge (par exemple <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>). Celle-ci contient la version PDF des fiches d'aide de toutes les fonctions publiques du package. Ce document se nomme *reference manual* (par exemple <https://cran.r-project.org/web/packages/dplyr/dplyr.pdf>). Dans certains cas, la page web d'un package sur le CRAN comporte un lien vers un site web documentant davantage le package. Elle comporte aussi parfois des guides d'utilisation du package, appelés *vignettes*, créés par les développeurs du package (par exemple <https://cran.r-project.org/web/packages/dplyr/vignettes/dplyr.html>).

Les vignettes d'un package sont aussi consultables hors-ligne, à partir de R. Dans le bas d'une fiche d'aide R, il y a toujours un lien vers l'index du package contenant la fonction documentée dans la fiche. Dans la première partie de cet index, il y a un lien vers les vignettes du package (nommé *User guides, package vignettes and other documentation*), si celui-ci en possède.

Il n'y a pas que le *R core team* et les autres développeurs de packages R qui fournissent de l'information sur des fonctions R. La communauté R étant très active, il est fréquent de trouver sur le web de l'information à propos d'une fonction R provenant d'utilisateurs de la fonction. Par exemple, lançons la recherche « **R function lm** » dans un moteur de recherche web tel que **Google**. Les résultats contiennent des versions en ligne de la fiche d'aide de la fonction ainsi que des pages web très pertinentes pour apprendre à utiliser la fonction, créées par des utilisateurs.

Comment dénicher une fonction pour réaliser une certaine tâche ?

Il est relativement facile d'obtenir de l'information lorsque nous connaissons le nom de la fonction à utiliser. Par contre, il est parfois moins facile de trouver le nom de la fonction qui répond à notre besoin.

Afin de trouver une fonction R qui effectue une certaine tâche, le premier endroit pour chercher est encore un moteur de recherche web. En entrant dans la barre de recherche « **R function** », suivi d'une courte description en anglais de la tâche à effectuer, il est fort probable que des résultats pertinents seront retournés. Le web contient vraiment beaucoup d'informations sur la programmation en R, principalement en anglais. Des pages sur des sites sociaux de questions/réponses tels que **StackOverflow** (<http://stackoverflow.com/questions/tagged/r>) ou **CrossValidated** (<http://stats.stackexchange.com/questions/tagged/r>) sont souvent suggérés.

Il existe aussi des outils de recherche spécifiques à R. Tout d'abord, la fonction R `help.start`, appelée sans lui fournir d'arguments en entrées, ouvre une table des matières contenant des liens vers la documentation R. Toute cette information est aussi accessible en ligne sur le site web <http://stat.ethz.ch/R-manual/R-patched/doc/html/>.

```
help.start()
```

Aussi, la fonction R `help.search` permet de rechercher la présence de chaînes de caractères dans les fiches d'aide R, par exemple :

```
help.search("regression")
```

Cependant, les fonctions `help`, `help.start` et `help.search` donnent uniquement accès à la documentation des packages R installés dans le chemin de recherche de la session R à partir de laquelle la commande est soumise. Pour faire une recherche dans les fiches d'aide de tous les packages R sur le CRAN, Bioconductor ou Github, le site web suivant est un bon outil.

<http://www.rdocumentation.org/>

Le site web <http://rseek.org/> permet d'élargir la recherche à :

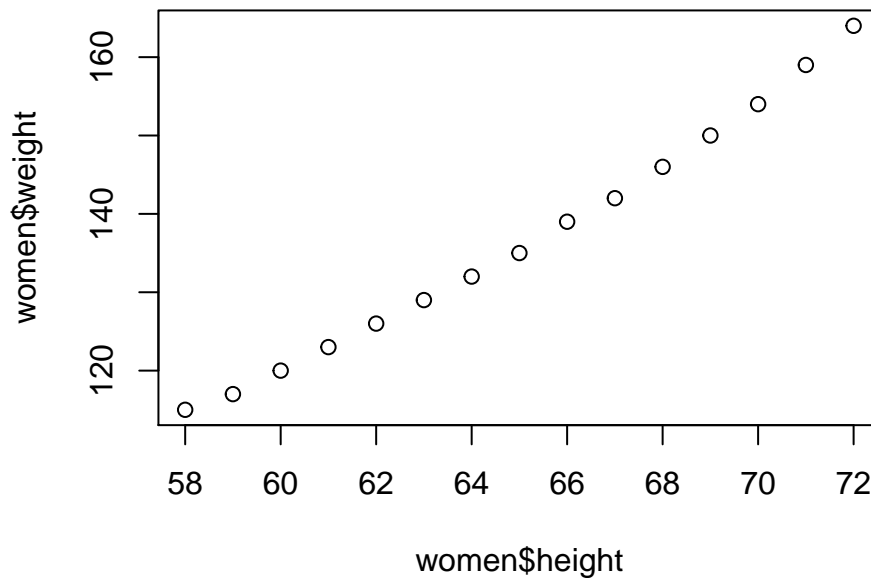
- toute la documentation distribuée par l'équipe de R, incluant les manuels du *R core team* (<http://cran.r-project.org/manuals.html>) ;
- les messages publiés sur les listes courriel de R (<http://www.r-project.org/mail.html>), dont le R-help où les abonnés peuvent poser des questions concernant R ;
- le R Journal (<http://journal.r-project.org/>) ;
- des blogues et autres sites web consacrés à R, dont R-bloggers (<http://www.r-bloggers.com/>) et Quick-R (<http://www.statmethods.net/>) ;
- le support et d'autres ressources offertes par RStudio (<https://support.rstudio.com>) ;
- etc.

Il existe en fait plusieurs outils de recherche de documentation R.

Comment faire un graphique ?

La fonction graphique de base en R est `plot`.

```
plot(x = women$height, y = women$weight)
```



Pour un vecteur de données `x` et un vecteur de données `y` fournis en entrée, elle génère un diagramme de dispersion.

Elle accepte plusieurs autres types d'objets comme premier argument. Par exemple, si elle reçoit en entrée un objet créé par la fonction `lm`, elle génère quelques graphiques de résidus (non affichés ici).

```
plot(reg)
```

La fonction `plot` n'est que la pointe de l'iceberg de toutes les possibilités graphiques de R. Un cours sera consacré à ce sujet.

Est-ce que de la programmation orientée objet est possible en R ?

La fonction `plot`, mentionnée ci-dessus, a un comportement qui s'adapte à la classe de l'objet assigné à son premier argument. Il s'agit d'une fonction générique *polymorphe* propre à un langage orienté objet. Ainsi, la programmation orientée objet est possible en R. Il y a même plus d'un système R de programmation orientée objet. La fonction `plot` du package `graphics` est une fonction générique issue du système orienté objet S3, le plus simple et encore le plus courant en R.

Jetons un coup d'œil au corps de la fonction `plot`.

```
plot
```

```
## function (x, y, ...)
## UseMethod("plot")
## <bytecode: 0x00000000142ce760>
## <environment: namespace:graphics>
```

La fonction `plot` possède seulement trois arguments : `x`, `y` et `...`. Aussi, le corps de la fonction est un peu particulier. Il est très court. Il contient uniquement un appel à la fonction `UseMethod`. Cette caractéristique indique que `plot` est une fonction générique de type S3.

À travers l'appel à la fonction `UseMethod`, la fonction `plot` appelle une sous-fonction (appelée *méthode*), choisie selon la classe de l'objet fourni en entrée comme valeur pour le premier argument (ici `x`). Pour énumérer toutes les « versions » d'une fonction générique auxquelles notre installation de R nous donne accès, il faut appeler la fonction `methods` comme suit.

```
methods(plot)
```

```
## [1] plot.acf*          plot.data.frame*    plot.decomposed.ts*
## [4] plot.default       plot.dendrogram*    plot.density*
## [7] plot.ecdf          plot.factor*        plot.formula*
## [10] plot.function      plot.hclust*        plot.histogram*
## [13] plot.HoltWinters*   plot.isoreg*        plot.lm*
## [16] plot.medpolish*     plot.mlm*           plot.ppr*
## [19] plot.prcomp*       plot.princomp*      plot.profile.nls*
## [22] plot.raster*       plot.spec*          plot.stepfun
## [25] plot.stl*          plot.table*         plot.ts
## [28] plot.tskernel*     plot.TukeyHSD*
## see '?methods' for accessing help and source code
```

Les caractères se trouvant après le point dans le nom d'une méthode S3 représentent une classe d'objets. Par exemple, `lm` est la classe des objets retournés par la fonction du même nom. C'est la méthode `plot.lm` qui est appelée lorsque `plot` reçoit en entrée un objet de classe `lm`.

Les méthodes sont souvent documentées, au même titre que les fonctions. Par exemple, la fiche d'aide ouverte par `help(plot.lm)` fournit de l'information à propos du comportement de la fonction `plot` avec un objet de classe `lm`,

La programmation orientée objet est un sujet technique plutôt avancé. Nous reviendrons sur ce concept vers la fin de la session.

Comment conserver une trace des commandes soumises au cours d'une session R ?

Il est possible de sauver l'**historique des commandes** soumises au cours d'une session R avec la fonction `savehistory`. Le fichier ainsi créé (d'extension `.Rhistory` par défaut) contient une énumération de toutes les commandes soumises dans la console depuis l'ouverture de R.

Il est aussi possible de sauver l'**environnement de travail** avec la fonction `save.image`. Le fichier ainsi créé (d'extension `.RData` par défaut) contient tout le contenu de l'environnement de travail, soit tous les objets créés depuis l'ouverture de R (et jamais effacés).

Astuce : En fait, la console R garde toujours une trace en mémoire des commandes que vous avez soumises (comme le Terminal Linux). Vous pouvez parcourir cet historique, dans la console, avec les touches « flèche vers le haut » et « flèche vers le bas » de votre clavier. Ainsi, pour soumettre de nouveau une commande, vous pouvez éviter de la retaper en y accédant à l'aide de la touche « flèche vers le haut ».

Comment quitter R ?

La commande `q()` provoque la fin de la session R, tout comme la fermeture de la fenêtre de la console R. R demande alors si une **image de la session** doit être sauvegardée. Si la réponse fournie à cette question est oui, R sauvegarde l'historique des commandes dans un fichier nommé « `.Rhistory` » et le contenu de l'environnement de travail dans un fichier nommé « `.RData` ».

Qu'est-ce que le répertoire de travail ?

R a parfois besoin de lire ou d'écrire dans des fichiers externes. Il le fait par exemple :

- lors de l'importation de données provenant d'un fichier externe (lecture dans un fichier) ;
- lors de l'enregistrement de l'historique des commandes ou de l'environnement de travail (écriture dans un fichier).

R se définit un emplacement par défaut pour ces fichiers. Cet emplacement se nomme **répertoire de travail** (en anglais *working directory*), parfois appelé répertoire courant. Lorsqu'aucun emplacement n'est spécifié lors d'une communication entre R et un fichier externe, R considérera par défaut que le fichier se situe dans le répertoire de travail.

Comment contrôler le répertoire de travail ?

La commande suivante permet de connaître le répertoire de travail :

```
getwd()
```

La suivante permet de le modifier :

```
setwd("cheminAccesRepertoire")
```

où "cheminAccesRepertoire" est le chemin d'accès d'un répertoire sur votre ordinateur, par exemple "C:/MesDocuments" ou autre.

Attention : En R, les chemins d'accès contenant le caractère \ ne sont pas acceptés. Ce n'est pas très pratique pour ceux qui travaillent sous Windows, car un chemin d'accès copié à partir d'un explorateur de fichiers Windows contient ce caractère. Il faut toujours remplacer, dans un chemin d'accès fourni à R, les \ par / ou \\ (ex. : "C:\MesDocuments" devient "C:/MesDocuments" ou "C:\\MesDocuments").

Comment charger un fichier d'extension .RData ?

Les objets sauvegardés dans un fichier d'extension .RData deviennent accessibles en R après que le fichier soit chargé avec la fonction `load`.

Attention : Si le répertoire de travail de R à son ouverture contient un fichier .RData, les objets contenus dans ce fichier sont automatiquement chargés en R. Dans ce cas, l'environnement de travail n'est pas vide en début de session.

Astuce : Je recommande de ne jamais accepter l'enregistrement d'une image de la session à la fermeture d'une session R, afin que le répertoire de travail par défaut ne contienne pas de fichier d'extension .RData et que toute nouvelle session R démarre avec un environnement de travail vide. Partir d'un environnement de travail vide aide à garder le contrôle sur son contenu et ainsi à éviter des erreurs de manipulation de mauvaises données.

Pourquoi créer des programmes R plutôt que de travailler directement dans la console ?

Retrouver des commandes spécifiques dans un ancien historique peut être difficile. Une meilleure méthode de travail que de travailler directement dans la console R consiste à rédiger des *programmes R*, aussi appelés *scripts R*. Les programmes facilitent la réutilisation du code.

Faire rouler un ancien programme recrée tous les objets produits par les instructions dans le programme (ce qui remplace une image de session). Si le code de création de certains objets est long à exécuter, ces objets

peuvent être enregistrés dans un fichier externe lors de leur création d'origine. Ensuite, pour utiliser ces objets, il suffit de les charger dans une session R (au lieu de faire rouler de nouveau le code pour les créer). Nous verrons comment faire ça lors d'un prochain cours.

Un programme R comporte donc une série d'instructions R. Il peut aussi inclure des commentaires, soit des caractères non exécutés, par exemple pour expliquer ce que font les instructions. Sur une ligne d'un programme R, tous les caractères suivant le symbole `#` sont considérés comme étant des commentaires.

```
# Exemple de ligne en commentaire  
1 + 1 # exemple de commentaire suivant une instruction
```

Quel outil utiliser pour éditer un programme R ?

Un programme R s'édite dans une fenêtre séparée de la console. Le GUI de la version Windows de R possède un éditeur de code R minimaliste, qui s'ouvre par le menu « Fichier > Nouveau script ». Par convention, l'**extension .R ou .r** est donnée à un programme R. À partir de cet éditeur, le raccourci clavier Ctrl-R permet de soumettre dans la console des lignes de code de l'éditeur.

Il existe cependant des outils bien plus performants que cet éditeur pour programmer en R. Plusieurs éditeurs de code R ou environnements intégrés de développement R (en anglais IDE pour Integrated Development Environment) sont offerts, notamment :

- RStudio (<http://www.rstudio.com/>),
- des extensions R pour Visual Studio Code (par exemple <https://marketplace.visualstudio.com/items?itemName=Ikuyadeu.r>)
- Emacs avec ESS (<http://ess.r-project.org/>),
- Eclipse avec StatET (<https://eclipse.org/statet>),
- Tinn-R (<http://sourceforge.net/projects/tinn-r/>),
- etc.

Caractéristiques de RStudio

RStudio est probablement le plus populaire de ces outils. Il s'agit d'un IDE déjà très complet et qui continue d'être activement développé. Une version gratuite du logiciel est offerte (<https://www.rstudio.com/products/rstudio/download/>, version « Desktop, Open Source License »). Nous utiliserons RStudio dans ce cours.

RStudio facilite le travail en R, par exemple grâce aux caractéristiques suivantes.

- Éditeur de code R, notamment pourvu de
 - coloration syntaxique,
 - complètement automatique (en anglais *autocompletion*),
 - fermeture automatique de parenthèses, guillemets et crochets,
 - pliage de code.
- Fenêtre divisée en sous-fenêtres, comprenant chacune potentiellement un choix de sous-fenêtres en onglets. La configuration par défaut propose les 4 sous-fenêtres suivantes :
 - en haut à gauche : l'**éditeur R** (possibilité d'avoir plusieurs programmes ouverts, accessibles via des onglets) ;
 - en bas à gauche : la **console R** (aussi une fenêtre *Terminal* et autres) ;
 - en haut à droite : la visualisation du contenu des **environnements** chargés (aussi de l'historique des commandes et autres) ;
 - en bas à droite : la visualisation de, notamment,
 - * l'arborescence de **fichiers** (*Files*) sur votre ordinateur,
 - * les **graphiques** produits (*Plots*),
 - * les **packages** installés ,
 - * les fiches d'**aide** (*Help*).
- Possibilité de lancer certaines commandes à partir de menus, notamment :
 - des appels aux fonctions courantes telles que :

- * **help** : en utilisant la barre de recherche de la sous-fenêtre *Help*,
 - * **install.packages** : en utilisant le bouton *Install* de la sous-fenêtre *Packages*,
 - * **setwd** : par le menu *Session > Set Working Directory*;
- des commandes de construction de package par le menu *Build* ;
- Nombreux raccourcis clavier (<https://support.rstudio.com/hc/en-us/articles/200711853-Keyboards-Shortcuts>), notamment :
 - les raccourcis usuels tels que :
 - * **Ctrl-C** / **Ctrl-V** pour effectuer un copier / coller,
 - * **Ctrl-Z** pour annuler la dernière action,
 - * **Ctrl-S** pour enregistrer le document courant,
 - * etc. ;
 - **Ctrl-Enter** pour soumettre (dans la console) la ligne du programme source où le curseur se situe ou la sélection (dans l'éditeur) ;
 - **Tab** ou **Ctrl+Space** pour tenter un complètement automatique.

Plusieurs autres fonctionnalités de RStudio permettent de travailler de façon plus productive.

Détails concernant le complètement automatique (*autocompletion*) : RStudio peut compléter nos commandes pour nous. En cours de saisie d'une commande dans la console ou dans un script R, RStudio ouvre une petite fenêtre contenant des suggestions de suite à notre commande. Si cette fenêtre ne s'ouvre pas d'elle-même, la touche « Tab » devrait permettre de l'ouvrir. RStudio propose des suggestions de suite pour :

- les noms d'objets se trouvant dans un des environnements dans le chemin de recherche,
- les noms des éléments d'une liste ou les noms de colonnes d'un data frame après l'opérateur \$,
- les arguments à ajouter à un appel de fonction,
- etc.

Si vous n'aimez pas ce comportement, vous pouvez le configurer par le menu « Tools > Global Options... > Code, onglet Completion.

Détails concernant la fermeture automatique de parenthèses, guillemets et crochets : RStudio offre aussi de fermer les parenthèses, guillemets et crochets automatiquement. Ainsi, si nous ouvrons une parenthèse dans un programme ou dans la console, une parenthèse fermante est automatiquement ajoutée à la ligne de commande.

Si vous n'aimez pas cette fonctionnalité, vous pouvez l'enlever par le menu « Tools > Global Options... > Code, onglet Editing, en décochant l'option « Insert matching parens/quotes ».

La [fiche sur l'installation de R](#) mentionne d'autres configurations de RStudio qui pourraient vous intéresser.

Quelles sont les règles de syntaxe du langage R ?

Lors de l'écriture de code R, il y a quelques règles de syntaxe à respecter. En plus des [règles concernant les choix de noms d'objets](#) énumérées précédemment, voici les règles de base du langage R.

- Chaque commande doit se terminer par un retour de chariot ou un point-virgule (moins usuel).
- Une commande peut s'étaler sur plusieurs lignes.
- Il est possible de mettre plusieurs commandes sur une même ligne, à condition de séparer les commandes par des points-virgules.
- Les différents éléments d'une commande peuvent ou non être séparés par un ou plusieurs espaces. C'est uniquement une question de style.
- Dans un nombre réel, la décimale est représentée par un point et non par une virgule.
- Le symbole # sert à insérer des commentaires dans un programme R. Sur une ligne, tout ce qui se trouve après un # est ignoré par R lors de l'exécution d'un programme.
- R fait toujours la distinction entre les majuscules et les minuscules (il respecte la casse des caractères).

Comment connaître et modifier les paramètres d'une session R ?

Une session R comporte un certain nombre de paramètres nommés options. La fonction R `options` permet de connaître les paramètres de notre session, ainsi que de les modifier. Il faut d'abord aller voir la fiche d'aide de la fonction (ouverte par la commande `help(options)`⁶), pour obtenir de l'information sur ces paramètres.

Par exemple, la façon dont les nombres sont affichés dans la console est notamment contrôlée par les options `digits` et `scipen`. Ces options prennent par défaut les valeurs suivantes.

```
# Afin de garder une copie des valeurs par défaut avant de les modifier
optionsDefaut <- options()
```

```
optionsDefaut$digits
```

```
## [1] 7
```

```
optionsDefaut$scipen
```

```
## [1] 0
```

L'option `digits` représente le nombre maximal de chiffres affichés, par exemple :

```
1.23456789
```

```
## [1] 1.234568
```

Le nombre est arrondi pour respecter ce nombre maximal de chiffres. Cette option peut être modifiée comme suit.

```
options(digits = 4)
1.23456789
```

```
## [1] 1.235
```

Pour toute nouvelle session R démarrée, la valeur par défaut de `digits` retombe à 7 (sauf si ce paramètre est modifié dans le fichier de configuration de R). Si nous avons préalablement enregistré les valeurs par défaut des options, il est facile de redonner à `digits` sa valeur par défaut comme suit.

```
options(digits = optionsDefaut$digits)
```

L'option `scipen` contrôle pour sa part l'affichage en format scientifique. R affiche les très grands nombres dans ce format. Par exemple, par défaut

```
100000
```

```
## [1] 1e+05
```

est affiché en format scientifique, mais pas

```
10000
```

```
## [1] 10000
```

En modifiant la valeur de `scipen` comme suit

```
options(scipen = -1)
```

10000 sera lui aussi affiché en format scientifique.

⁶<https://stat.ethz.ch/R-manual/R-patched/library/base/html/options.html>

10000

```
## [1] 1e+04
```

Où trouver plus d'information ?

Voici des sources d'information sur l'utilisation de R et la programmation R. Cette liste n'est pas exhaustive. Les sources d'information R sont très nombreuses !

Documentation de R : fiches d'aide des fonctions et manuels du R core team :

- accessible à partir de la console au cours d'une session R grâce aux fonctions `help.start`, `help` et `help.search` ;
- accessible en ligne :
 - <http://stat.ethz.ch/R-manual/R-patched/doc/html/>,
 - <https://cran.r-project.org/manuals.html>,
 - <http://www.r-project.org/> > « Documentation » dans le menu de gauche.

Référence officielle pour le logiciel R et sa documentation (retournée par la commande `citation()`) :

R Core Team (2019). R : A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Documentation de packages R qui ne se retrouvent pas dans l'installation de base :

- accessible à partir de la console au cours d'une session R lorsque les packages sont installés dans le chemin de recherche de la session grâce aux fonctions `help.start`, `help` et `help.search` ;
- accessible en ligne :
 - <https://cran.r-project.org/web/packages/>,
 - <http://bioconductor.org/packages>.

Outils de recherche dans la documentation de R :

- <http://www.rdocumentation.org/>,
- <http://rseek.org/>.
- <https://r-pkg.org/>
- <https://rdr.io/>,

Sites web à propos de R :

- <http://larmarange.github.io/analyse-R/>,
- <http://www.statmethods.net/>,
- <http://www.cookbook-r.com/>,
- <http://www.r-graph-gallery.com/>.

Exercices ou formations R :

- <http://r-exercises.com/>,
- <http://swirlstats.com>,
- <http://swcarpentry.github.io/r-novice-inflammation/>,
- <http://swcarpentry.github.io/r-novice-gapminder/>,
- <https://www.udemy.com/course/r-basics/>.

Outils sociaux de questions/réponses :

- StackOverflow (<http://stackoverflow.com/questions/tagged/r>),
- CrossValidated (<http://stats.stackexchange.com/questions/tagged/r>),
- la liste courriel R-help (<https://stat.ethz.ch/mailman/listinfo/r-help>).

Outils pour suivre la communauté R :

- <http://www.r-bloggers.com/>,
- <https://rweekly.org/>,
- hashtag #rstats sur Twitter : <https://twitter.com/hashtag/rstats>,
- le groupe « The R Project for Statistical Computing » sur LinkedIn : <https://www.linkedin.com/groups/77616>.

Livres et notes de cours

Référence officielle pour les notes de ce cours :

- Baillargeon, S. (2020). R pour scientifique : notes de cours, STT-4230/STT-6230. Université Laval, Département de mathématiques et de statistique. URL <https://stt4230.rbind.io/>

Livres que j'utilise le plus :

- Matloff, N. (2011). The art of R programming : A tour of statistical software design. No Starch Press.
- Wickham, H. (2019). Advanced R, Second Edition. Chapman and Hall/CRC. URL <https://adv-r.hadley.nz/>
 - Solutionnaire des exercices dans ce livre : <https://advanced-r-solutions.rbind.io/>
- Wickham, H. (2015). R packages. O'Reilly Media, Inc. URL <http://r-pkgs.had.co.nz/>
- Grolemund, G. et Wickham, H. (2016). R for Data Science. O'Reilly Media, Inc. URL <http://r4ds.had.co.nz/>

Autres livres :

- Adler, J. (2010). R in a nutshell : A desktop quick reference. 2e édition. O'Reilly Media, Inc.
- Braun, W. J. et Murdoch, D. (2007). A first Course in Statistical Programming with R. Cambridge University Press.
- Chambers, J. M. (2016). Extending R. Chapman and Hall/CRC.
- Chambers, J. M. (2008). Software for Data Analysis : Programming with R. Springer.
- Cotton, R. (2013). Learning R : A Step-by-Step Function Guide to Data Analysis, O'Reilly Media.
- Davies, T. M. (2016). The Book of R : A First Course in Programming and Statistics. No Starch Press.
- Gillespie, C. et Lovelace, R. (2016). Efficient R Programming : A Practical Guide to Smarter Programming. O'Reilly Media, Inc. URL <https://csgillespie.github.io/efficientR/>
- Gentleman, R. (2009). R Programming for Bioinformatics. Chapman and Hall/CRC.
- Kabacoff, R. (2015), R in action. 2e édition. Manning Publications.
- Muenchen, R. A. (2011). R for SAS and SPSS Users. Second edition. Springer.
- Teetor, P. (2011). R Cookbook. O'Reilly Media.
- Zumel, N. et Mount, J. (2014). Practical Data Science with R. Manning Publications Co.
- Zuur, A. F., Ieno, E. N. et Meesters, E. H.W.G. (2009). A Beginner's Guide to R. Springer.

Notes de cours d'introduction à R et à la programmation informatique (en français) :

- Goulet, V. (2019). Programmer avec R. Université Laval, École d'actuariat. URL <https://vigou3.gitlab.io/programmer-avec-r/>