

Devellopping R packages with C++

A beginner guide

Hervé Perdry

2022-07-06

Table des matières

About this document	5
1 Objets de R	7
1.1 R objects have types	7
1.2 R objects have attributes.	9
1.3 How to look further at the objects' structure	10
1.4 Pour les apprentis sorciers	11
2 Introducing C++	13
2.1 Using Rcpp::sourceCpp	13
2.2 Hello world	13
2.3 Why types are necessary	14
2.4 Integers	15
2.5 Les flottants	18
2.6 Opérateurs arithmétiques	20
2.7 Conversion de type: les "cast"	21
2.8 Booléens	22
2.9 Tableaux de taille fixe	22
2.10 Contrôle du flux d'exécution : les boucles	23
2.11 Contrôle du flux d'exécution : les alternatives	26
3 Création d'un package R	27
3.1 Créer l'arborescence de fichiers	27
3.2 Inclure une fonction C++	28
3.3 Ce que Rstudio a fait avant la compilation	29
3.4 Inclure une fonction R	29
3.5 Contrôler quelles sont les fonctions exportées	29
3.6 Documenter les fonctions avec roxygen2	30
3.7 Générer le fichier NAMESPACE avec roxygen2	31

4 Manipuler les objets de R en C++	33
4.1 Premiers objets Rcpp : les vecteurs	33
4.2 Vecteurs	35
4.3 Vecteurs nommés	38
4.4 Objets génériques : SEXP	40
4.5 Facteurs	41
4.6 Listes et Data frames	42
5 Sucre syntaxique	45
5.1 Efficacité	46
5.2 Un exemple de la Rcpp Gallery	47
6 Exemple : Metropolis-Hastings	49
6.1 L'algorithme	49
6.2 Première version en C++	52
6.3 Une version améliorée	52

About this document

This document assumes that the reader is familiar with R; no previous knowledge of C++ is assumed.

The first chapter presents rapidly the main data structures used in R (vectors, matrix, factors, list, data frames), showing in particular how

The second chapter presents the very bases of C++ and Rcpp. In this chapter you will use the function `Rcpp::sourceCpp` to compile C++ code from R. All the example code is available on github.

The third chapter shows how to create a R package. The resulting package can be installed from github.

After that, every chapter is associated to a package that you can install to test directly the code in it.

Les comparaisons de temps d'exécution qui apparaissent ici ont été obtenues avec une installation de R « standard » (pas de librairie comme openBlas ou autre), une compilation avec `clang++`, sur une machine linux disposant de 8 cœurs à 3.60 GHz, avec un cache de 8 MB. Des comparaisons avec d'autres compilateurs ou sur d'autres machines peuvent donner des résultats (très) différents, tant en valeur des temps d'exécution qu'en comparaison des performances.

L'idéal serait d'amener les lecteurs d'une part à une bonne connaissance des possibilités offertes par Rcpp, d'autre part au niveau nécessaire pour ouvrir *The C++ programming language* de Bjarne Stroustrup – on recommande, avant de se frotter à cet énorme et patibulaire ouvrage de référence (1300 pages), le plus court et plus amène *A tour of C++* du même auteur.

Chapitre 1

Objets de R

On supposera que les objets de R sont bien connus. Dans ce court chapitre nous allons simplement voir comment examiner leur structure.

1.1 R objects have types

L'instruction `typeof` permet de voir le type des objets. Considérons trois vecteurs, une matrice, une liste, un data frame, un facteur.

1.1.1 Numerical types

```
> typeof( c(1.234, 12.34, 123.4, 1234) )  
[1] "double"
```

```
> typeof( runif(10) )  
[1] "double"
```

```
> M <- matrix( rpois(12, 2), 4, 3)  
> typeof(M)  
[1] "integer"
```

```
> F <- factor( c("F", "M", "F", "F") )  
> typeof(F)  
[1] "integer"
```

Il y a deux types de variables numériques : `double` (nombres « à virgule », en format dit « flottant ») et `integer` (entiers). Les entiers s'obtiennent en tapant `0L`, `1L`, etc; certaines commandes renvoient des entiers:

```
> typeof(0)  
[1] "double"
```

```
> typeof(0L)  
[1] "integer"
```

```
> typeof(0:10)
[1] "integer"
```

```
> typeof( which(runif(5) > 0.5) )
[1] "integer"
```

```
> typeof( rpois(10, 1) )
[1] "integer"
```

On remarque que le facteur F a pour type integer. Ce petit mystère s'éclaircira bientôt.

1.1.2 Logical

We shall see later that, internally, the logical TRUE and FALSE are stored as integers 1 and 0. They however have their proper type.

```
> typeof( c(TRUE, FALSE) )
[1] "logical"
```

1.1.3 Lists

Data frame are lists. This will be clarified soon.

```
> L <- list(a = runif(10), b = "dada")
> typeof(L)
[1] "list"
```

```
> D <- data.frame(x = 1:10, y = letters[1:10])
> typeof(D)
[1] "list"
```

1.1.4 A glimpse on the objects type

Pour examiner le contenu d'un objet avec une information sur son type, on peut utiliser `str`.

```
> str(M)
int [1:4, 1:3] 0 5 4 4 1 2 1 2 0 0 ...
```

```
> str(F)
Factor w/ 2 levels "F","M": 1 2 1 1
```

```
> str(L)
List of 2
 $ a: num [1:10] 0.968 0.351 0.508 0.41 0.306 ...
 $ b: chr "dada"
```



```
> str(D)
'data.frame': 10 obs. of 2 variables:
 $ x: int  1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
 $ y: chr  "a" "b" "c" "d" ...
```

1.2 R objects have attributes.

Les objets de R ont des « attributs ». Ainsi donner des noms aux éléments d'un vecteur revient à lui donner un attribut `names`.

```
> c <- runif(4)
> names(c) <- c("elt1", "elt2", "elt3", "elt4")
> c
      elt1      elt2      elt3      elt4
0.9386205 0.2815406 0.5513706 0.7650667
```

```
> attributes(c)
$names
[1] "elt1" "elt2" "elt3" "elt4"
```

Ce qui différencie une matrice d'un vecteur, c'est l'attribut `dim`:

```
> attributes(M)
$dim
[1] 4 3
```

Les data frames et les facteurs ont également des attributs :

```
> attributes(D)
$names
[1] "x" "y"

$class
[1] "data.frame"

$row.names
[1] 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
```

```
> attributes(F)
$levels
[1] "F" "M"

$class
[1] "factor"
```

Les attributs peuvent être modifiés avec la syntaxe `attributes(x) <- ...` ou un individuellement avec `attr(x, which)` :

```
> attr(M, "dim")
[1] 4 3

> attr(M, "dim") <- c(2L, 6L)
> M
      [,1] [,2] [,3] [,4] [,5] [,6]
[1,]    0    4    1    1    0    0
[2,]    5    4    2    2    0    1
```

1.3 How to look further at the objects' structure

La fonction `dput` permet d'obtenir une forme qui peut être copiée dans une autre session R ; ceci permet parfois d'obtenir des informations plus précises sur la représentation interne d'un objet. Nous allons l'utiliser ici pour mieux comprendre la construction des matrices, des data frames, et des facteurs.

Il est nécessaire de jeter au préalable un œil à l'aide de `structure` pour mieux comprendre le résultat. On y précise notamment :

```
For historical reasons (these names are used when deparsing),
attributes '".Dim"', '".Dimnames"', '".Names"', '".Tsp"' and
'".Label"' are renamed to '"dim"', '"dimnames"', '"names"',
'"tsp"' and '"levels"'.
```

1.3.1 Matrices are vectors

```
> dput(M)
structure(c(0L, 5L, 4L, 4L, 1L, 2L, 1L, 2L, 0L, 0L, 0L, 1L), .Dim = c(2L,
6L))
```

Une matrice est un vecteur muni d'un attribut `dim` (qui apparaît comme `.Dim` dans le résultat de `dput`).

1.3.2 Data Frame are lists

```
> dput(D)
structure(list(x = 1:10, y = c("a", "b", "c", "d", "e", "f",
"g", "h", "i", "j")), class = "data.frame", row.names = c(NA,
-10L))
```

Un data frame est une liste munie d'un attribut `class = "data.frame"` et d'un attribut `row.names` (ici, la valeur de cet attribut est la convention pour « 4 lignes non nommées »).

1.3.3 Factors are integer vectors

```
> dput(F)
structure(c(1L, 2L, 1L, 1L), .Label = c("F", "M"), class = "factor")
```

```
> levels(F)
[1] "F" "M"
```

Un facteur est qu'un vecteur d'entiers muni d'attributs `class = "factor"`. et `levels` (les niveaux du facteur), qui apparaît dans `structure` sous le nom `.Label` ; cet attribut est également accessible via la fonction `levels`.

On peut par exemple fabriquer un facteur à partir d'un vecteur d'entiers, ainsi :

```
> G <- c(2L, 1L, 1L, 2L)
> attributes(G) <- list(levels = c("L1", "L2"), class = "factor")
> G
[1] L2 L1 L1 L2
Levels: L1 L2
```

1.4 Pour les apprentis sorciers

La fonction interne `inspect` permet de voir l'adresse où se trouve l'objet, son type (d'abord codé numériquement, par exemple 13 pour `integer` puis le nom conventionnel de ce type, `INTSXP`), et quelques autres informations ; les objets complexes (leurs attributs) sont déroulés.

```
> .Internal(inspect( 1:10 ))
@562a53552508 13 INTSXP g0c0 [REF(65535)] 1 : 10 (compact)
```

```
> .Internal(inspect( c(0.1, 0.2) ))
@562a53b9ead8 14 REALSXP g0c2 [] (len=2, tl=0) 0.1,0.2
```

```
> a <- c(0.1, 0.2)
> .Internal(inspect( a ))
@562a53af93b8 14 REALSXP g0c2 [REF(2)] (len=2, tl=0) 0.1,0.2
```

```
> names(a) <- c("A", "B")
> .Internal(inspect( M ))
@562a55f0c708 13 INTSXP g0c4 [MARK,REF(5),ATT] (len=12, tl=0) 0,5,4,4,1,...
ATTRIB:
  @562a53f52060 02 LISTSXP g0c0 [MARK,REF(1)]
    TAG: @562a53137700 01 SYMSXP g0c0 [MARK,REF(2538),LCK,gp=0x4000] "dim" (has value)
    @562a553da768 13 INTSXP g0c1 [MARK,REF(65535)] (len=2, tl=0) 2,6
```

```
> .Internal(inspect( L ))
@562a54529bd8 19 VECSXP g0c2 [MARK,REF(3),ATT] (len=2, tl=0)
  @562a547e9798 14 REALSXP g0c5 [MARK,REF(2)] (len=10, tl=0) 0.968094,0.351445,0.507678,0.409528,0.3058
  @562a53c87850 16 STRSXP g0c1 [MARK,REF(4)] (len=1, tl=0)
    @562a53c878f8 09 CHARXP g0c1 [MARK,REF(1),gp=0x60] [ASCII] [cached] "dada"
ATTRIB:
  @562a5337ba30 02 LISTSXP g0c0 [MARK,REF(1)]
    TAG: @562a53137310 01 SYMSXP g0c0 [MARK,REF(19354),LCK,gp=0x4000] "names" (has value)
    @562a54529e58 16 STRSXP g0c2 [MARK,REF(65535)] (len=2, tl=0)
      @562a5341a3b8 09 CHARXP g0c1 [MARK,REF(36),gp=0x61] [ASCII] [cached] "a"
      @562a5373e478 09 CHARXP g0c1 [MARK,REF(15),gp=0x61] [ASCII] [cached] "b"
```

Les plus braves pourront consulter le code de cette fonction, ainsi que tout le code de R, à cette adresse : [<https://github.com/wch/r-source/tree/trunk/src>] plus précisément pour inspect, dans `src/main/inspect.c...`

```
## Loading required package: readr
```

Chapitre 2

Introducing C++

Types (integer, floats, bool), arrays, and flow control statements.

2.1 Using Rcpp::sourceCpp

If you are using linux, install R, Rstudio and the Rcpp package (use `install.packages("Rcpp")`), as well as a C++ compiler such as g++.

If you are using Windows or macOS, install R, Rstudio, the Rcpp package, and Rtools. The simplest way to make sure everything works is to follow the following instructions:

1. Installer Rcpp via la commande `install.packages("Rcpp")`
2. Cliquer dans le menu `file > new > c++ file` (ou l'équivalent en français) pour créer un nouveau fichier C++ ; un fichier contenant quelques lignes d'exemples va être créé. Sauvez ce fichier puis cliquez sur Source. Rstudio doit vous proposer d'installer "Rtools" : acceptez.
3. Cliquer à nouveau sur Source. Tout doit fonctionner...! Vous êtes prêt à apprendre le C++.

Les exemples de code proposés utilisent souvent le standard C++11. Pour pouvoir compiler avec ce standard, n'omettez pas la ligne `// [[Rcpp::plugins(cpp11)]]` in the source files. Alternatively, using `Sys.setenv("PKG_CXXFLAGS" = "-std=c++11")` inside a R session will enable C++11 compilation once for all.

2.2 Hello world

```
// file: vec.cpp
#include <Rcpp.h>
// Création d'un vecteur (initialisé à 0)
// [[Rcpp::export]]
Rcpp::NumericVector vec0(int n) {
  Rcpp::NumericVector x(n);
  return x;
}

// accès aux éléments
```

```
// [[Rcpp::export]]
Rcpp::IntegerVector vec1(int n) {
  Rcpp::IntegerVector x(n);
  for(int i = 0; i < n; i++) {
    x[i] = i*i;
  }
  return x;
}
```

Il faut toujours commencer par saluer le monde. Créez un fichier `hello.cpp` contenant le code suivant :

```
// file: hello.cpp
#include <Rcpp.h>
#include <iostream>
//[[Rcpp::export]]
void hello() {
  Rcpp::Rcout << "Hello world!\n";
}
```

Compilez le depuis R (il faut avoir installé le package Rcpp) :

```
library(Rcpp)
sourceCpp("hello.cpp")
```

(ou, si vous utilisez R Studio, cliquez sur « source »...). Appelez ensuite la fonction en R :

```
> hello()
Hello world!
```

Dans le programme C++, les directives d'inclusion `#include` servent à inclure des bibliothèques. La bibliothèque `Rcpp.h` permet l'interaction avec les objets de R ; la définition de l'objet `Rcpp::Rcout`, un « flux de sortie » (output stream) qui permet l'écriture dans la console R y est incluse. La bibliothèque `iostream` contient en particulier la définition de l'opérateur `<<`. Elle n'est en fait pas nécessaire ici car `Rcpp.h` contient une directive d'inclusion similaire.

2.3 Why types are necessary

C++ est un langage compilé et non interprété. Le compilateur est le programme qui lit le code C++ et produit un code assembleur puis du langage machine (possiblement en passant par un langage intermédiaire).

Les instructions de l'assembleur (et du langage machine qui est sa traduction numérique directe) manipulent directement les données sous formes de nombre codés en binaire, sur 8, 16, 32 ou 64 bits. La manipulation de données complexes (des vecteurs, des chaînes de caractères) se fait bien sûr en manipulant une suite de tels nombres.

Pour que le compilateur puisse produire de l'assembleur, il faut qu'il sache la façon dont les données sont codées dans les variables. La conséquence est que toutes les variables doivent être déclarées, et ne pourrions pas changer de type ; de même, le type des valeurs retournées par les fonctions doit être fixé, ainsi que celui de leurs paramètres.

Les fantaisies permises par R (voir ci-dessous) ne sont plus possibles (étaient-elles souhaitables ?).

```
fantaisies <- function(a) {
  if(a == 0) {
    return(a)
  } else {
    return("Non nul")
  }
}
```

```
> fantaisies(0)
[1] 0
```

```
> fantaisies(1)
[1] "Non nul"
```

```
> fantaisies("0")
[1] "0"
```

```
> fantaisies("00")
[1] "Non nul"
```

La librairie standard de C++ offre une collection de types de données très élaborés et de fonctions qui les manipulent. Nous commencerons par les types fondamentaux : entiers, flottants, booléens.

2.4 Integers

There are several types of integers in C++.

2.4.1 The four main types of integers.

Compilez ce programme qui affiche la taille (en octets) des quatre types d'entiers (signés) (le résultat peut théoriquement varier d'une architecture à l'autre, c'est-à-dire qu'il n'est pas fixé par la description officielle du C++).

```
// file: int_types.cpp
#include <Rcpp.h>
using namespace Rcpp;
//[[Rcpp::export]]
void int_types() {
  char a;
  short b;
  int c;
  long int d;
  int64_t e;

  Rcout << "sizeof(a) = " << sizeof(a) << "\n";
  Rcout << "sizeof(b) = " << sizeof(b) << "\n";
  Rcout << "sizeof(c) = " << sizeof(c) << "\n";
  Rcout << "sizeof(d) = " << sizeof(d) << "\n";
  Rcout << "sizeof(e) = " << sizeof(e) << "\n";
}
```

Notez une nouveauté ci-dessus : la directive `using namespace Rcpp` qui permet de taper `Rcout` au lieu de `Rcpp::Rcout`. C'est commode mais à utiliser avec parcimonie (et à bon escient) : il n'est en effet pas rare que des fonctions appartenant à des namespace différents portent le même nom. La syntaxe `namespace::fonction` permet d'éviter toute ambiguïté.

```
> int_types()
sizeof(a) = 1
sizeof(b) = 2
sizeof(c) = 4
sizeof(d) = 8
sizeof(e) = 8
```

Une compilation sous Windows ne produit pas les mêmes résultats: les `long int` ne font que 32 bits. Pour une implémentation portable, la solution est d'utiliser des types où la taille est explicite, comme `int64_t`.

Les entiers de R correspondent au type `int` (sur 32 bits) mais cela ne vous empêche pas de manipuler dans vos fonctions C++ des entiers plus courts ou plus longs si vous en avez besoin.

2.4.2 Unsigned integers

Il existe aussi des types non signés, par exemple `unsigned int` ou `unsigned char` ; et des raccourcis variés, par exemple `size_t` pour `unsigned long int` ou `uint16_t` pour des entiers non signés de 16 bits.

```
// file: non_signes.cpp
#include <Rcpp.h>
using namespace Rcpp;
//[[Rcpp::export]]
void non_signes() {
  int16_t x = 32766;
  uint16_t y = 32766;
  Rcout << "x = " << x << ", y = " << y << "\n";
  x = x+1; y = y+1;
  Rcout << "x = " << x << ", y = " << y << "\n";
  x = x+1; y = y+1;
  Rcout << "x = " << x << ", y = " << y << "\n";
  x = x+1; y = y+1;
  Rcout << "x = " << x << ", y = " << y << "\n";
}
```

Sur 16 bits, les entiers non signés vont de -32768 à 32767, et les entiers signés de 0 à 65535:

```
> non_signes()
x = 32766, y = 32766
x = 32767, y = 32767
x = -32768, y = 32768
x = -32767, y = 32769
```

2.4.3 Numerical overflow


```
// file: overflow.cpp
#include <Rcpp.h>
using namespace Rcpp;
//[[Rcpp::export]]
void overflow() {
  unsigned short x(65530);
  Rcout << "x = " << x << "\n" ;
  x = x+5;
  Rcout << "x = " << x << "\n" ;
  x = x+5;
  Rcout << "x = " << x << "\n" ;
}
```

```
> overflow()
x = 65530
x = 65535
x = 4
```

2.4.4 Notre première fonction « non void »

Écrivons notre première fonction qui renvoie une valeur. Son type doit être déclaré comme ceci :

```
// file: somme_entiers.cpp
//[[Rcpp::export]]
int somme_entiers(int a, int b) {
  return a+b;
}
```

Et testons la :

```
> somme_entiers(1L, 101L)
[1] 102
```

```
> somme_entiers(1.9, 3.6)
[1] 4
```

Que se passe-t-il ? Utilisez la fonction suivante pour comprendre.

```
// file: cast_to_int.cpp
//[[Rcpp::export]]
int cast_to_int(int x) {
  return x;
}
```

2.4.5 Initialisation des variables

Il est nécessaire d'initialiser les variables.

```
// file: uninit.cpp
//[[Rcpp::export]]
int uninit() {
    int a; // a peut contenir n'importe quoi
    return a;
}
```

Testons :

```
> uninit()
[1] 0
```

```
> uninit()
[1] 0
```

On aura parfois 0, mais pas systématiquement (cela dépend de l'état de la mémoire). On peut initialiser `a` lors de la déclaration : `int a = 0;`

2.5 Les flottants

Il y a trois types de nombres en format flottant. Le type utilisé par R est le `double` de C++.

2.5.1 The free types of floating point numbers

```
// file: float_types.cpp
#include <Rcpp.h>
//[[Rcpp::export]]
void float_types() {
    float a;
    double b;
    long double c;
    Rcpp::Rcout << "sizeof(a) = " << sizeof(a) << "\n";
    Rcpp::Rcout << "sizeof(b) = " << sizeof(b) << "\n";
    Rcpp::Rcout << "sizeof(c) = " << sizeof(c) << "\n";
}
```

2.5.2 Précision du calcul

Parenthèse de culture informatique générale. Voici ce que répond R au test $1.1 - 0.9 = 0.2$.

```
> 1.1 - 0.9 == 0.2
[1] FALSE
```

Pourquoi ? Est-ce que C++ fait mieux ? (Rappel : R utilise des `double`).

Sur les architectures courantes, les nombres au format `double` sont codés sur 64 bits (voir ci-dessus, taille 8 octets). C'est un format « à virgule flottante », c'est-à-dire qu'ils sont représentés sous la forme $a2^b$, où a et b sont bien sûr codés en binaire (sur 53 bits – dont un bit 1 implicite – pour a , 11 pour b , et un bit de signe).

Cette précision finie implique des erreurs d'arrondi. Pour plus de détails, voir Wikipedia sur la norme IEEE 754 : https://fr.wikipedia.org/wiki/IEEE_754

Quelle est la différence entre les nombres ci-dessus ?

```
> (1.1 - 0.9) - 0.2
[1] 5.551115e-17
```

C'est-à-dire 2^{-54} (une erreur au 53e chiffre...). Affichons la représentation interne des nombres en question avec la fonction `bits` du package `pryr`.

```
> pryr::bits(1.1 - 0.9)
[1] "00111111 11001001 10011001 10011001 10011001 10011001 10011001 10011100"
```

```
> pryr::bits(0.2)
[1] "00111111 11001001 10011001 10011001 10011001 10011001 10011001 10011010"
```

2.5.3 Valeurs spéciales et extrêmes

Il y a des valeurs spéciales en C++ comme en R : une valeur infinie, et une valeur non-définie NaN, pour *not a number*.

```
// file: divide.cpp
#include <Rcpp.h>
[[Rcpp::export]]
double divide(double a, double b) {
  double r = a/b;
  Rcpp::Rcout << a << " / " << b << " = " << r << std::endl;
  return r;
}
```

```
> divide(1,2)
1 / 2 = 0.5
[1] 0.5
```

```
> divide(1,0)
1 / 0 = inf
[1] Inf
```

```
> divide(-1,0)
-1 / 0 = -inf
[1] -Inf
```

```
> divide(0,0)
0 / 0 = -nan
[1] NaN
```

En C++, la fonction `numeric_limits` permet d'obtenir les valeurs extrêmes que peuvent prendre les `double`.

```
// file: numeric_limits.cpp
#include <Rcpp.h>
[[Rcpp::export]]
void numeric_limits() {
  Rcpp::Rcout
    << "plus petite valeur positive 'normale' = "
    << std::numeric_limits<double>::min() << "\n"
    << "plus petite valeur positive = "
    << std::numeric_limits<double>::denorm_min() << "\n"
    << "plus grande valeur = "
    << std::numeric_limits<double>::max() << "\n"
    << "epsilon = "
    << std::numeric_limits<double>::epsilon() << "\n";
}
```

```
> numeric_limits()
plus petite valeur positive 'normale' = 2.22507e-308
plus petite valeur positive          = 4.94066e-324
plus grande valeur                   = 1.79769e+308
epsilon                             = 2.22045e-16
```

2.5.4 Constantes numériques

Attention, si le R considère que 0 ou 1 est un double (il faut taper 0L ou 1L pour avoir un integer), pour C++ ces valeurs sont des entiers. Pour initialiser proprement un double il faudrait normale taper 0. ou 0.0, etc; cependant le compilateur fera la conversion de type si nécessaire.

2.6 Opérateurs arithmétiques

Les opérateurs arithmétiques sont bien entendu +, -, * et /. Pour les entiers, le modulo est %.

```
// file: division_entiere.cpp
#include <Rcpp.h>
[[Rcpp::export]]
void division_entiere(int a, int b) {
  int q = a / b;
  int r = a % b;
  Rcpp::Rcout << a << " = " << b << " * " << q << " + " << r << std::endl;
}
```

```
> division_entiere(128, 7)
128 = 7 * 18 + 2
```

À ces opérateurs, il faut ajouter des opérateurs d'assignation composée +=, -=, *= et /= qui fonctionnent ainsi : `x += 4;` est équivalent à `x = x + 4;`, et ainsi de suite. Il y a aussi les opérateurs d'incrémentement ++ et de décrémentation --.

```
// file: operateurs_exotiques.cpp
#include <Rcpp.h>
[[Rcpp::export]]
```

```

void operateurs_exotiques(int a) {
    Rcpp::Rcout << "a = " << a << std::endl;

    Rcpp::Rcout << "a *= 2;" << std::endl;
    a *= 2;
    Rcpp::Rcout << "a = " << a << std::endl;

    Rcpp::Rcout << "int b = a++;" << std::endl;
    int b = a++; // post incrementation
    Rcpp::Rcout << "b = " << b << std::endl;
    Rcpp::Rcout << "a = " << a << std::endl;

    Rcpp::Rcout << "int c = ++a;" << std::endl;
    int c = ++a; // pre incrementation
    Rcpp::Rcout << "c = " << c << std::endl;
    Rcpp::Rcout << "a = " << a << std::endl;
}

```

```

> operateurs_exotiques(3)
a = 3
a *= 2;
a = 6
int b = a++;
b = 6
a = 7
int c = ++a;
c = 8
a = 8

```

2.7 Conversion de type: les “cast”

Le compilateur peut réaliser une conversion d'un type à l'autre: on parle de *cast*. Cette conversion peut être implicite, lors par exemple d'une copie d'un type `double` vers un type `int` ; elle peut être explicite, lors par exemple de la copie d'une valeur de type `double` vers un `int` ; elle peut être rendue explicite en mettant un nom de type entre parenthèses devant une variable : `(int) x` fera une conversion de `x` vers le type `int` (si le type de `x` rend ça possible).

```

// file: cast.cpp
#include <Rcpp.h>
[[Rcpp::export]]
void cast(int x, int y) {
    double a = x; // cast implicite
    double b = (double) y; // cast explicite
    double q1 = x / y; // cast implicite (à quel moment a-t-il lieu ?)
    double q2 = (double) x / (double) y; // cast explicite
    Rcpp::Rcout << "q1 = " << q1 << "\n";
    Rcpp::Rcout << "q2 = " << q2 << "\n";
}

```

Cet exemple montre les écueils du cast implicite :

```
> cast(4,3)
q1 = 1
q2 = 1.33333
```

Lors du calcul de q1, le cast a été fait après la division entière... était-ce le comportement désiré ?

2.8 Booléens

Le type `bool` peut prendre les valeurs vrai/faux. Il correspond au type `logical` de R.

```
// file: test_positif.cpp
// [[Rcpp::export]]
bool test_positif(double x) {
    return (x > 0);
}
```

Les opérateurs de test sont comme en R, `>`, `>=`, `<`, `<=`, `==` et `!=`. Les opérateurs logiques sont `&&` (et), `||` (ou) et `!` (non). **Attention !** Les opérateurs `&` et `|` existent également, ce sont des opérateurs logiques bit à bit qui opèrent sur les entiers.

```
// file: test_interval.cpp
// [[Rcpp::export]]
bool test_interval(double x, double min, double max) {
    return (min <= x && x <= max);
}
```

2.9 Tableaux de taille fixe

On peut définir des tableaux de taille fixe fixe (connue à la compilation) ainsi:

```
// file: petit_tableau.cpp
#include <Rcpp.h>
#define SHOW(x) Rcpp::Rcout << #x << " = " << (x) << std::endl;
//[[Rcpp::export]]
void petit_tableau() {
    int a[4] = {0,2,7,11};
    SHOW(a)      // wut ?
    SHOW(a[0])
    SHOW(a[1])
    SHOW(a[2])
    SHOW(a[3])
}
```

L'occasion est saisie pour montrer l'utilisation d'une macro. La ligne `SHOW(a[0])` est remplacée par `Rcpp::Rcout << "a[0]" << " = " << (a[0]) << std::endl;` **avant** la compilation. Les macros peuvent rendre de grand services pour la clarté du code ou pour faciliter le débogage « manuel ».

L'utilisation de parenthèse autour de `(x)` dans la définition de la macro est très conseillée : si on utilisait par exemple `SHOW(a == b)` il n'y a aucun problème avec la syntaxe `Rcout << (a == b) << std::endl;` mais `Rcout << a == b << std::endl;` pourrait poser des problèmes de priorité des opérateurs `==` et `<<`...

Le résultat de `SHOW(a)` sera expliqué plus tard (pointeurs).

2.10 Contrôle du flux d'exécution : les boucles

2.10.1 Boucles for

Plus de 90% des boucles for s'écrivent ainsi :

```
// file: ze_loop.cpp
#include <Rcpp.h>
// [[Rcpp::export]]
void ze_loop(int n) {
  for(int i = 0; i < n; i++) {
    Rcpp::Rcout << "i = " << i << std::endl;
  }
}
```

```
> ze_loop(4)
i = 0
i = 1
i = 2
i = 3
```

Le premier élément dans la parenthèse (ici, `int i = 0`) est l'initialisation ; il sera exécuté une seule fois, et c'est généralement une déclaration de variable (avec une valeur initiale). Le deuxième élément (`i < n`) est la condition à laquelle la boucle sera exécutée une nouvelle fois, c'est généralement une condition sur la valeur de la variable ; et le dernier élément (`i++`) est exécuté à la fin de chaque tour de boucle, c'est généralement une mise à jour de la valeur de cette variable.

Il est facile par exemple d'aller de 2 en 2 :

```
// file: bouclette.cpp
#include <Rcpp.h>
// [[Rcpp::export]]
void bouclette(int n) {
  for(int i = 0; i < n; i += 2) {
    Rcpp::Rcout << "i = " << i << std::endl;
  }
}
```

```
> bouclette(6)
i = 0
i = 2
i = 4
```

Pour revenir sur les types d'entiers : gare au dépassement arithmétique.

```
// file: arithmetic_overflow.cpp
#include <Rcpp.h>
// [[Rcpp::export]]
void arithmetic_overflow() {
  int x = 1;
  for(int i = 0; i < 33; i++) {
    Rcpp::Rcout << "2^" << i << " = " << (x) << "\n";
    x = 2*x;
  }
}
```

```

    }
}

```

Essayer avec unsigned int, long int.

2.10.2 continue et break

Une instruction continue en cours de boucle fait passer au tour suivant :

```

// file: trois.cpp
#include <Rcpp.h>
// [[Rcpp::export]]
void trois(int n) {
    for(int i = 1; i <= n; i++) {
        Rcpp::Rcout << i << " ";
        if(i%3 != 0)
            continue;
        Rcpp::Rcout << "\n";
    }
    Rcpp::Rcout << "\n";
}

```

```

> trois(9)
1 2 3
4 5 6
7 8 9

```

Quant à break, si s'agit bien sûr d'une interruption de la boucle.

```

// file: zz.cpp
#include <Rcpp.h>
// [[Rcpp::export]]
void zz(int n, int z) {
    for(int i = 0; i < n; i++) {
        Rcpp::Rcout << "A" ;
        if(i > z)
            break;
    }
    Rcpp::Rcout << std::endl;
}

```

```

> zz(14, 100)
AAAAAAAAAAAAAAAA

```

```

> zz(14, 5)
AAAAAAA

```

2.10.3 Boucles while et do while

Ces boucles ressemblent fort à ce qui existe en R. Dans un cas, le test est fait avant la boucle, dans l'autre il est fait après.


```
// file: a_rebours_1.cpp
#include <Rcpp.h>
// [[Rcpp::export]]
void a_rebours_1(int n) {
  while(n-- > 0) {
    Rcpp::Rcout << n << " ";
  }
  Rcpp::Rcout << std::endl;
}

// [[Rcpp::export]]
void a_rebours_2(int n) {
  do {
    Rcpp::Rcout << n << " ";
  } while(n-- > 0);
  Rcpp::Rcout << std::endl;
}
```

```
> a_rebours_1(3)
2 1 0
```

```
> a_rebours_2(3)
3 2 1 0
```

On peut aussi utiliser continue et break dans ces boucles.

Considérons un exemple un peu moins artificiel : le calcul d'une racine carrée par l'algorithme de Newton. L'avantage de la syntaxe do while est apparent ici.

```
// file: squareRoot.cpp
#include <Rcpp.h>
//[[Rcpp::export]]
double squareRoot(double x, double eps = 1e-5) {
  double s = 1;
  do {
    s = 0.5*(s + x/s);
  } while( fabs(s*s - x) > eps);
  return s;
}
```

```
> squareRoot(2)
[1] 1.414216
```

```
> squareRoot(2, 1e-8)
[1] 1.414214
```

Cherchez sur le site cppreference.com la description des fonctions abs et fabs. Pourquoi ne pouvait-on pas utiliser abs ici ? Est-il raisonnable de proposer une valeur trop petite pour eps ? Proposer une modification de la fonction qui évite cet écueil.

2.11 Contrôle du flux d'exécution : les alternatives

2.11.1 if et if else

Cela fonctionne tout à fait comme en R ; la x

```
// file: mini.cpp
// [[Rcpp::export]]
double mini(double x, double y) {
  double re = 0;
  if(x > y) {
    re = y;
  } else {
    re = x;
  }
  return re;
}
```

```
> mini(22, 355)
[1] 22
```

2.11.2 switch

Un exemple simple devrait permettre de comprendre le fonctionnement de switch.

```
// file: combien.cpp
#include <Rcpp.h>
// [[Rcpp::export]]
void combien(int n) {
  switch(n) {
    case 0:
      Rcpp::Rcout << "aucun\n";
      break;
    case 1:
      Rcpp::Rcout << "un seul\n";
      break;
    case 2:
      Rcpp::Rcout << "deux\n";
      break;
    case 3:
    case 4:
    case 5:
      Rcpp::Rcout << "quelques uns\n";
      break;
    default:
      Rcpp::Rcout << "beaucoup\n";
  }
}
```

Chapitre 3

Création d'un package R

Pour diffuser votre travail, ou pour ne pas avoir besoin de recompiler vos fonctions à chaque fois, il faut créer un package R. Rstudio est d'une grande aide pour cela. Nous allons dans ce chapitre faire les premiers pas dans la création d'un package ; le tome du manuel de R intitulé *Writing R extensions* reste une référence indispensable.

Le package que nous allons créer s'appelle `introRcppPackages`. Vous pouvez le retrouver à l'adresse <https://github.com/introRcpp/introRcppPackages>.

3.1 Créer l'arborescence de fichiers

Pour commencer sélectionner le menu File l'option New Project, puis New Directory, puis R package using Rcpp. Vous allez pouvoir choisir à quel endroit le nouveau répertoire qui va contenir votre package (et portera son nom) sera installé. Nous choisissons d'appeler notre package `introRcppPackages`.

Le répertoire `introRcppPackages/` contient:

- les fichiers `DESCRIPTION` et `NAMESPACE`
- les répertoires `R/`, `src/` et `man/` dont nous allons parler plus bas
- des fichiers qui ne font pas partie du package :
 - un fichier `Read-and-delete-me` (obtempérez)
 - un fichier `introRcppPackages.Rproj` et un dossier (caché) `.Rproj.user/` qui sont utilisés par Rstudio
 - un fichier `.Rbuildignore` qui contient des expressions régulières destinées à informer R de la présence de fichiers qui ne font pas partie du package...

Le contenu de `DESCRIPTION` est assez clair – vous pouvez et devez le modifier:

```
Package: introRcppPackages
Type: Package
Title: What the Package Does in One 'Title Case' Line
Version: 1.0
Date: 2020-03-24
Author: Your Name
Maintainer: Your Name <your@email.com>
Description: One paragraph description of what the package does as one or more full
             sentences.
License: GPL (>= 2)
Imports: Rcpp (>= 1.0.3)
LinkingTo: Rcpp
```

Il est possible d'inclure des informations supplémentaires, par exemple un champ `Encoding` pour spécifier la façon dont les éventuelles lettres accentuées sont encodées (`latin1` et `UTF-8` sont les solutions les plus fréquentes). J'insère pour ma part la ligne

```
Encoding: UTF-8
```

qui correspond à l'encodage par défaut sous Linux et Mac OS et me permet d'accentuer correctement mon prénom dans le champ `Author`. Les utilisateurs de Windows choisiront peut-être plus commodément l'encodage `latin1`, mais Rstudio peut gérer l'encodage de votre choix et vous demande de choisir lors de la première sauvegarde d'un fichier.

Le fichier `NAMESPACE` contient deux lignes importantes pour l'utilisation de fonctions écrites avec Rcpp:

```
useDynLib(introRcppPackages, .registration=TRUE)
importFrom(Rcpp, evalCpp)
```

La ligne

```
exportPattern("^[:alpha:]]+")
```

dit à R que toutes les fonctions dont le nom commence par un caractère alphanumérique sont exportées du package. C'est très bien quand on ne développe que pour soi, pour un package destiné à la diffusion il est souvent nécessaire de modifier cela. Nous le ferons plus tard.

3.2 Inclure une fonction C++

Les fonctions C++ sont dans le répertoire `src/`. Il contient deux fichiers, `rcpp_hello_world.cpp` qui contient quelques exemples basiques ; et `RcppExports.cpp`, qui est généré par la fonction `Rcpp::compileAttributes()`. Dans un premier temps vous pouvez ignorer son contenu.

Créons un fichier `squareRoot.cpp`, contenant

```
#include <Rcpp.h>
#include <cmath>
// [[Rcpp::export]]
double squareRoot(double x) {
  if(x < 0)
    return NAN;
  double s = 1;
  // an eps that's scale with x
  double eps = x * std::numeric_limits<double>::epsilon() * 2;
  do {
    s = 0.5*(s + x/s);
  } while( fabs(s*s - x) > eps);
  return s;
}
```

Le nom du fichier n'a pas besoin de coïncider avec celui de la fonction, c'est juste plus commode pour s'y retrouver. Vous pouvez maintenant cliquer sur `Install and Restart` (sous l'onglet `Build`). Rstudio compile le package et relance la session R, puis charge le package. Vous pouvez tester la fonction `squareRoot` !

```
library(introRcppPackages)
squareRoot(123)
## [1] 11.09054
```

3.3 Ce que Rstudio a fait avant la compilation

Rstudio a appelé la fonction `Rcpp::compileAttributes()` qui a modifié le fichier `RcppExports.cpp`. Elle a créé cette fonction

```
RcppExport SEXP _introRcppPackages_squareRoot(SEXP xSEXP) {
BEGIN_RCPP
    Rcpp::RObject rcpp_result_gen;
    Rcpp::RNGScope rcpp_rngScope_gen;
    Rcpp::traits::input_parameter< double >::type x(xSEXP);
    rcpp_result_gen = Rcpp::wrap(squareRoot(x));
    return rcpp_result_gen;
END_RCPP
}
```

qui est en fait celle qui est appelée par R. Comment cela ? La fonction R qui correspond est dans le fichier `R/RcppExports.R`:

```
squareRoot <- function(x) {
  .Call('_introRcppPackages_squareRoot', x)
}
```

3.4 Inclure une fonction R

La fonction `squareRoot` n'est pas totalement satisfaisante. Une bonne idée serait de vérifier – dans le code R – que l'utilisateur a bien passé un unique élément de type double. On peut créer dans le répertoire `R/` un fichier qu'on appellera par exemple `square.root.r` et qui contient

```
square.root <- function(x) {
  if( typeof(x) != "double" )
    stop("This function works on doubles")
  if( length(x) != 1 )
    stop("This function works on single numbers")
  squareRoot(x)
}
```

3.5 Contrôler quelles sont les fonctions exportées

Puisqu'on a créé `square.root`, on ne veut pas que l'utilisateur puisse utiliser `squareRoot`. On va donc modifier notre `NAMESPACE` pour qu'il contienne

```
useDynLib(introRcppPackages, .registration=TRUE)
importFrom(Rcpp,evalCpp)
export(square.root)
```

Ainsi la seule fonction exportée par notre package est `square.root`. On peut toujours, à nos risques et périls, utiliser la fonction non exportée avec la syntaxe `introRcppPackages:::squareRoot` (notez le triple deux-points).

3.6 Documenter les fonctions avec roxygen2

Les fichiers de documentation sont inclus dans le répertoire `man/`. Ce sont des fichiers en `.Rd` qui peuvent être écrits à la main ; une solution qui s'avère à l'usage très commode (facilité d'écriture d'une part, de maintenance du package d'autre part) est de les faire générer par `roxygen2`.

Pour cela il faut tout d'abord installer ce package : `install.packages("roxygen2")`. Il est possible que l'installation soit pénible car ce package dépend de `xml2` qui nécessite d'installer d'autres composantes logicielles sur le système. Soyez attentifs aux messages d'erreur, ils sont informatifs. Une solution simple sous un linux de type Ubuntu est d'utiliser le gestionnaire de paquets pour installer `r-cran-xml2` ou `r-cran-roxygen2` !

Pour documenter la fonction `square.root`, placez le curseur dans cette fonction puis cliquez sur la baguette magique et choisissez `Insert Roxygen Skeleton`. Votre fichier ressemble maintenant à ceci:

```
#' Title
#'
#' @param x
#'
#' @return
#' @export
#'
#' @examples
square.root <- function(x) {
  if( typeof(x) != "double" )
    stop("This function works on doubles")
  if( length(x) != 1 )
    stop("This function works on single numbers")
  squareRoot(x)
}
```

On va compléter cette ébauche ainsi:

```
#' Computes a square root
#'
#' @param x a double vector of length 1
#'
#' @details This function is for pedagogical illustration only. Please use
#' 'base::sqrt' in R or 'sqrt' in C++.
#'
#' @return The square root of 'x'
#' @export
#'
#' @examples
#' square.root(2)
#'

square.root <- function(x) {
  if( typeof(x) != "double" )
    stop("This function works on doubles")
  if( length(x) != 1 )
```

```
stop("This function works on single numbers")
squareRoot(x)
}
```

Maintenant, on va faire générer à Rstudio le fichier `man/square.root.Rd` qui correspond. Pour cela, il faut d'abord aller dans l'onglet Build, puis cliquer sur More, Configure Build Tools, cocher la case Generate documentation with Roxygen (cocher au minimum la case Rd files).

Ensuite, cliquez sur Build > More > Document pour faire générer ce fichier. Comme notre page d'aide contient des lettres accentuées, cela ne fonctionnera que si vous avez inséré dans DESCRIPTION la ligne Encoding: UTF-8. Le message d'erreur en l'absence de ce champ n'est pas très instructif, l'information se trouve dans un des warnings qui suit. En pratique, la documentation est généralement écrite en anglais, et les lettres accentuées y sont presque toujours absentes.

Une fois la documentation générée (regardez le contenu de `man/square.root.Rd`) vous pouvez réinstaller le package et admirer la page de documentation en tapant `?square.root` et `example(square.root)`.

```
square.root {introRcppPackages}
```

R Documentation

Computes a square root

Description

Computes a square root

Usage

```
square.root(x)
```

Arguments

x a double vector of length 1

Details

This function is for pedagogical illustration only. Please use 'base::sqrt' in R or 'sqrt' in C++.

Value

The square root of 'x'

Examples

```
square.root(2)
```

FIGURE 3.1 – Documentation de la fonction `square.root`

3.7 Générer le fichier NAMESPACE avec roxygen2

Le tag `@export` de roxygen2 signale que cette fonction est exportée. Cela permet à roxygen2 de générer, en plus de l'aide, le fichier NAMESPACE et nous évite d'insérer à la main des lignes d'exportation comme

`export(square.root)`. Cependant roxygen2 refuse (sagement) d'effacer un NAMESPACE qu'il n'a pas généré lui-même.

Pour y remédier il semble qu'il n'y ait pas de meilleure solution que d'insérer au début du fichier NAMESPACE la ligne suivante, qui permet à roxygen2 de considérer que le NAMESPACE peut être effacé:

```
# Generated by roxygen2
```

Il existe sûrement une solution plus propre. Un problème subsiste cependant: roxygen2 ne génère pas les deux lignes indispensables au fonctionnement d'un package avec Rcpp, que nous avons mentionnées plus haut. La solution est d'insérer dans le répertoire R/ un fichier à cette fin. Nous l'appellerons par exemple `zzz.r` et il contiendra les lignes suivantes:

```
#' @useDynLib introRcppPackages, .registration=TRUE
#' @importFrom Rcpp evalCpp
NULL
## NULL
```

Le NULL final peut être remplacé par un 0 ou ce que vous voulez (des appels aux fonctions `.onLoad` et `.onAttach` par exemple), mais il faut qu'il y ait un objet R à évaluer sinon le fichier n'est pas pris en compte par roxygen2.

Chapitre 4

Manipuler les objets de R en C++

All the examples are in the R package... Install it with

```
> devtools::install_github("introRcpp/introRcppManipulation")
```

Load it with

```
library(introRcppManipulation)
##
## Attaching package: 'introRcppManipulation'
## The following objects are masked from 'package:introRcppBases':
##
##      vec0, vec1
```

4.1 Premiers objets Rcpp : les vecteurs

La librairie Rcpp définit des types `NumericVector`, `IntegerVector` et `LogicalVector` qui permettent de manipuler en C++ les vecteurs de R.

4.1.1 Créer des vecteurs, les manipuler

L'initialisation avec la syntaxe utilisée dans `vec0` remplit le vecteur de 0. Notez l'accès aux éléments d'un vecteur par l'opérateur `[]`; **contrairement à la convention utilisée par R, les vecteurs sont numérotés de 0 à n-1.**

```
// file: vec.cpp
#include <Rcpp.h>
// Création d'un vecteur (initialisé à 0)
// [[Rcpp::export]]
Rcpp::NumericVector vec0(int n) {
  Rcpp::NumericVector x(n);
  return x;
}

// accès aux éléments
// [[Rcpp::export]]
```

```
Rcpp::IntegerVector vec1(int n) {
  Rcpp::IntegerVector x(n);
  for(int i = 0; i < n; i++) {
    x[i] = i*i;
  }
  return x;
}
```

4.1.2 Exemple : compter les zéros

```
// file: countZeroes.cpp
#include <Rcpp.h>
//[[Rcpp::export]]
int countZeroes(Rcpp::IntegerVector x) {
  int re = 0;
  // x.size() et x.length() renvoient la taille de x
  int n = x.size();
  for(int i = 0; i < n; i++) {
    if(x[i] == 0) ++re;
  }
  return re;
}
```

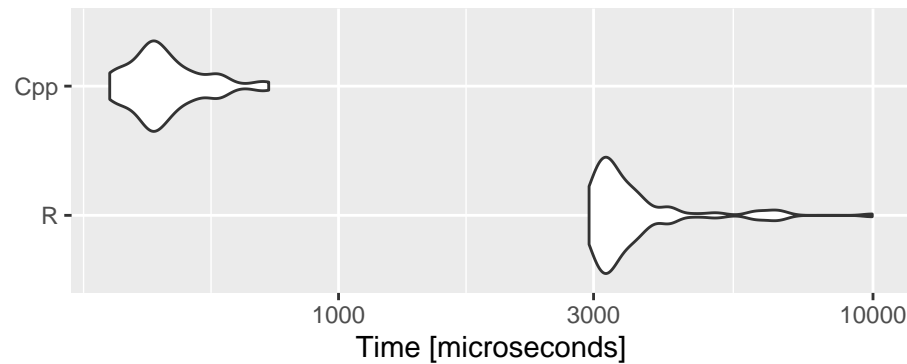
Comment les performances de cette fonction se comparent-elles avec le code R `sum(a == 0)` ?

```
> set.seed(1); a <- sample(0:99, 1e6, TRUE)
> countZeroes(a);
[1] 10017
```

```
> sum(a == 0)
[1] 10017
```

```
> mbm <- microbenchmark::microbenchmark( R = sum(a == 0), Cpp = countZeroes(a))
> mbm
Unit: microseconds
expr      min       lq      mean    median      uq      max  neval
R  2942.820 3132.573 3657.1297 3292.343 3631.9655 9967.703   100
Cpp  373.118  430.027  478.8504  457.761  507.6465  740.095   100
```

```
> ggplot2::autoplot(mbm)
```



La différence de vitesse d'exécution s'explique en partie par le fait que le code R commence par créer un vecteur de type `logical` (le résultat de `a == 0`), puis le parcourt pour faire la somme. Ceci implique beaucoup de lectures écritures en mémoire, ce qui ralentit l'exécution.

4.2 Vecteurs

4.2.1 Creating vectors

On a vu l'initialisation avec la syntaxe `NumericVector R(n)` qui crée un vecteur de longueur n , rempli de 0. On peut utiliser `NumericVector R(n, 1.0)` pour un vecteur rempli de 1 ; **attention à bien taper 1.0 pour avoir un double et non un int; dans le cas contraire, on a un message d'erreur difficilement compréhensible à la compilation.**

On peut utiliser `NumericVector R = no_init(n)` pour un vecteur non initialisé (ce qui fait gagner du temps d'exécution).

```
// file: zeros.cpp
#include <Rcpp.h>
using namespace Rcpp;
//[[Rcpp::export]]
IntegerVector zeros(int n) {
  IntegerVector R(n);
  return R;
}
```

```
// file: whatever.cpp
#include <Rcpp.h>
using namespace Rcpp;
//[[Rcpp::export]]
IntegerVector whatever(int n, int a) {
  IntegerVector R(n, a);
  return R;
}
```

```
// file: uninitialized.cpp
#include <Rcpp.h>
using namespace Rcpp;
//[[Rcpp::export]]
IntegerVector uninitialized(int n) {
```

```
IntegerVector R = no_init(n);
return R;
}
```

```
// file: favourites.cpp
#include <Rcpp.h>
using namespace Rcpp;
//[[Rcpp::export]]
IntegerVector favourites() {
  IntegerVector R = IntegerVector::create(1, 4, 8);
  return R;
}
```

```
> zeros(5)
[1] 0 0 0 0 0
```

```
> whatever(5, 2L)
[1] 2 2 2 2 2
```

```
> uninitialized(5) # sometime 0s, not always
[1] 1393792824      22058 1408024384      22058 1412751584
```

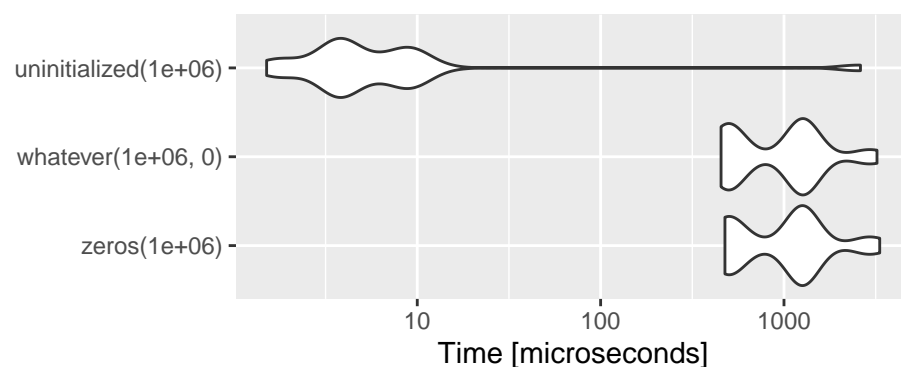
```
> favourites()
[1] 1 4 8
```

Comparons les performances des trois premières fonctions (comme à chaque fois, les résultats peuvent varier d'une architecture à l'autre).

```
> mbm <- microbenchmark::microbenchmark(zeros(1e6), whatever(1e6, 0), uninitialized(1e6))
> mbm
Unit: microseconds
```

expr	min	lq	mean	median	uq	max	neval
zeros(1e+06)	476.313	496.1680	1160.1336	1223.2480	1272.024	3327.421	100
whatever(1e+06, 0)	453.595	496.2065	1095.1564	1211.5220	1264.008	3215.110	100
uninitialized(1e+06)	1.508	3.5685	107.2748	4.0175	8.811	2612.648	100

```
> ggplot2::autoplot(mbm)
```



4.2.2 Accessing elements

Using `x.size()` or `x.length()`. Beware 0-based indices.

BLA BLA

4.2.3 Missing data

Cette fonction utilise `NumericVector::is_na` qui est la bonne manière de tester si un membre d'un vecteur entier est NA.

```
// file: countNAs.cpp
#include <Rcpp.h>
using namespace Rcpp;
// [[Rcpp::export]]
int countNAs(NumericVector x) {
  int re = 0;
  int n = x.size();
  for(int i = 0; i < n; i++) {
    re += NumericVector::is_na(x[i]);
  }
  return(re);
}
```

Une nouveauté : le fichier `countNAs.h` ...

```
// file: countNAs.h
#include <Rcpp.h>
int countNAs(Rcpp::NumericVector x);
```

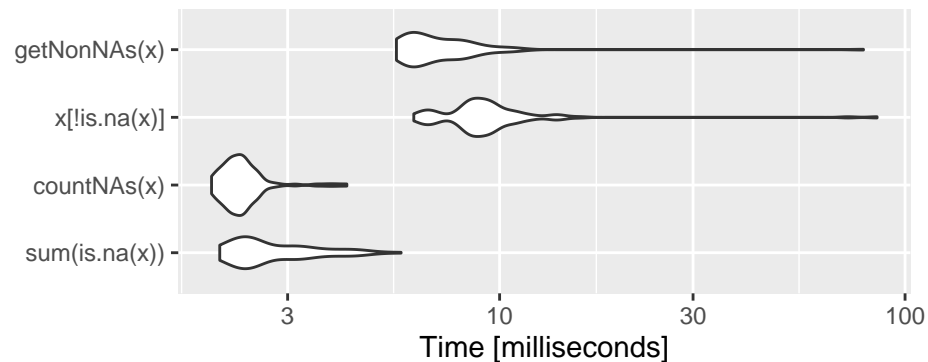
```
// file: getNonNAs.cpp
#include <Rcpp.h>
#include "countNAs.h"
using namespace Rcpp;
// [[Rcpp::export]]
NumericVector getNonNAs(NumericVector x) {
  int nbNAs = countNAs(x);
  int n = x.size();
  NumericVector R(n - nbNAs);
  int j = 0;
  for(int i = 0; i < n; i++) {
    if(!NumericVector::is_na(x[i])) {
      R[j++] = x[i];
    }
  }
  return R;
}
```

Comparons ces deux fonctions avec leurs analogues R, `sum(is.na(x))` et `x[!is.na(x)]`.

```
> x <- sample( c(NA, rnorm(10)), 1e6, TRUE)
> mbm <- microbenchmark::microbenchmark( sum(is.na(x)), countNAs(x), x[!is.na(x)], getNonNAs(x) )
```

```
> mbm
Unit: milliseconds
      expr    min      lq     mean  median      uq      max neval
sum(is.na(x)) 2.040216 2.293809  2.828908 2.483217 3.191447  5.715059   100
countNAs(x)   1.947507 2.142120  2.341943 2.282609 2.403440  4.199428   100
x[!is.na(x)]  6.141817 8.266056 10.550062 8.987245 9.812783 85.322724   100
getNonNAs(x)  5.565021 6.021748  7.799981 6.603530 7.941501 78.964833   100
```

```
> ggplot2::autoplot(mbm)
```



4.3 Vecteurs nommés

Ça n'est pas passionnant en soi (on ne manipule pas si souvent des vecteurs nommés), mais ce qu'on voit là sera utile pour les listes et les data frames.

4.3.1 Créer des vecteurs nommés

Voici d'abord comment créer un vecteur nommé.

```
// file: createVec1.cpp
#include <Rcpp.h>
using namespace Rcpp;
//[[Rcpp::export]]
NumericVector createVec1() {
  NumericVector x = NumericVector::create(Named("un") = 10, Named("deux") = 20);
  return x;
}
```

Application :

```
> a <- createVec1()
> a
  un deux
 10   20
```

Une syntaxe plus dense est possible :

```
// file: createVec2.cpp
#include <Rcpp.h>
using namespace Rcpp;
//[[Rcpp::export]]
NumericVector createVec2() {
  NumericVector x = NumericVector::create(_["un"] = 10, _["deux"] = 20);
  return x;
}
```

Cela produit le même résultat.

```
> createVec2()
un deux
10 20
```

4.3.2 Accéder aux éléments par leurs noms

On utilise toujours la syntaxe `x[]` :

```
// file: getOne.cpp
#include <Rcpp.h>
using namespace Rcpp;
//[[Rcpp::export]]
double getOne(NumericVector x) {
  if(x.containsElementNamed("one"))
    return x["one"];
  else
    stop("No element 'one'");
}
```

Notez la fonction `Rcpp::stop` qui correspond à la fonction R du même nom.

```
> getOne(a)
Error in getOne(a): No element 'one'
```

```
> getOne(b)
Error in getOne(b): object 'b' not found
```

4.3.3 Obtenir les noms d'un vecteur

Et voici comment obtenir les noms d'un vecteur.

```
// file: names1.cpp
#include <Rcpp.h>
using namespace Rcpp;
//[[Rcpp::export]]
CharacterVector names1(NumericVector x) {
  CharacterVector R = x.names(); // ou R = x.attr("names");
  return R;
}
```

Utilisons cette fonction:

```
> names1(a)
[1] "un" "deux"
```

Cette fonction semble se comporter correctement, elle a cependant un gros défaut. Nous y reviendrons dans la section suivante.

4.4 Objets génériques : SEXP

Les objets R les plus génériques sont les SEXP, « S expression ». Les principaux types de SEXP sont illustrés par la fonction suivante.

```
// file: RType.cpp
#include <Rcpp.h>
using namespace Rcpp;
//[[Rcpp::export]]
std::string RType(SEXP x) {
  switch( TYPEOF(x) ) {
    case INTSXP:
      return "integer";
    case REALSXP:
      return "double";
    case LGLSXP:
      return "logical";
    case STRSXP:
      return "character";
    case VECSXP:
      return "list";
    case NILSXP:
      return "NULL";
    default:
      return "autre";
  }
}
```

Utiliser les types définis par Rcpp est généralement plus facile et plus sûr. Cependant à l'intérieur des fonctions Rcpp ils peuvent être utiles, par exemple dans le cas où une fonction peut renvoyer des objets de types différents, par exemple soit un NILSXP, soit un objet d'un autre type.

4.4.1 Exemple : vecteurs nommés (ou pas)

Testons à nouveau la fonction `names1`, en lui passant un vecteur non nommé.

```
> b <- seq(0,1,length=6)
> names1(b)
Error in names1(b): Not compatible with STRSXP: [type=NULL].
```

Bien sûr, le vecteur `b` n'a pas de noms ; la fonction `x.names()` a renvoyé l'objet `NULL`, de type `NILSXP`, qui ne peut être utilisé pour initialiser le vecteur R de type `STRSXP`. Une solution est d'attraper le résultat de `x.names()` dans un SEXP, et de tester son type avec `TYPEOF`.


```
// file: names2.cpp
#include <Rcpp.h>
using namespace Rcpp;
//[[Rcpp::export]]
CharacterVector names2(NumericVector x) {
  SEXP R = x.names();
  if( TYPEOF(R) == STRSXP )
    return R;
  else
    return CharacterVector(0);
}
```

```
> names2(a)
[1] "un" "deux"
```

```
> names2(b)
character(0)
```

4.4.2 Exemple : énumérer les noms et le contenu

On va utiliser l'opérateur CHAR qui, appliqué à un élément d'un CharacterVector, renvoie une valeur de type `const char *` c'est-à-dire un pointeur vers une chaîne de caractère (constante, ie non modifiable) « à la C » (voir chapitre dédié).

```
// file: enumerate.cpp
#include <Rcpp.h>
using namespace Rcpp;
//[[Rcpp::export]]
void enumerate(NumericVector x) {
  SEXP r0 = x.names();
  if(TYPEOF(r0) != STRSXP) {
    Rcout << "No names\n";
    return;
  }
  CharacterVector R(r0);
  for(int i = 0; i < R.size(); i++) {
    double a = x[ CHAR(R[i]) ];
    Rcout << CHAR(R[i]) << " : " << a << "\n";
  }
}
```

```
> enumerate(a)
un : 10
deux : 20
```

4.5 Facteurs

```
// file: getLevels.cpp
#include <Rcpp.h>
```

```
using namespace Rcpp;
//[[Rcpp::export]]
CharacterVector getLevels(IntegerVector x) {
  SEXP R = x.attr("levels");
  switch(TYPEOF(R)) {
  case STRSXP:
    return R; // Rcpp prend soin que ce SEXP soit converti en CharacterVector
  case NILSXP:
    stop("No 'levels' attribute");
  default:
    stop("'levels' attribute of unexpected type");
  }
}
```

```
> x <- factor( sample(c("M","F"), 10, TRUE) )
> getLevels(x)
[1] "F" "M"
```

```
> x <- sample(1:2, 10, TRUE)
> # getLevels(x)
> attr(x, "levels") <- c(0.1, 0.4)
> # getLevels(x)
```

```
// file: someFactor.cpp
#include <Rcpp.h>
using namespace Rcpp;
//[[Rcpp::export]]
IntegerVector someFactor() {
  IntegerVector x = IntegerVector::create(1,1,2,1);
  x.attr("levels") = CharacterVector::create("F", "M");
  x.attr("class") = CharacterVector::create("factor");
  return x;
}
```

```
> someFactor()
[1] F F M F
Levels: F M
```

4.6 Listes et Data frames

Nous avons déjà vu les fonctions utiles dans le cas des vecteurs nommés, en particulier `containsElementNamed`.

La fonction suivante prend une liste `L` qui a un élément `L$alpha` de type `NumericVector` et renvoie celui-ci à l'utilisateur. En cas de problème un message d'erreur informatif est émis.

```
// file: getAlpha.cpp
#include <Rcpp.h>
using namespace Rcpp;
//[[Rcpp::export]]
NumericVector getAlpha(List x) {
  if( x.containsElementNamed("alpha") ) {
```

```

SEXP R = x["alpha"];
if( TYPEOF(R) != REALSXP )
    stop("alpha is not of type 'NumericVector'");
return R;
} else
    stop("No element named alpha");
}

```

Pour renvoyer des valeurs hétéroclites dans une liste c'est très facile:

```

// file: createList.cpp
#include <Rcpp.h>
using namespace Rcpp;
//[[Rcpp::export]]
List createList() {
    List L;
    L["a"] = NumericVector::create(1.0, 2.0, 4.0);
    L["b"] = 12;
    L["c"] = rnorm(4, 0.0, 1.0);
    return L;
}

```

```

> createList()
$a
[1] 1 2 4

$b
[1] 12

$c
[1] -1.2275839 -0.7487483 1.4054582 -0.1656251

```

Les data frames, ont l'a vu, sont des listes avec quelques attributs supplémentaires. En Rcpp cela fonctionne de la même façon, avec la classe `DataFrame`. Ils ont une certaine tendance à se transformer en liste quand on leur ajoute des éléments.

Here is a useful trick.

```

// file: createDF.cpp
#include <Rcpp.h>
using namespace Rcpp;
//[[Rcpp::export]]
DataFrame createDF() {
    List L;
    L["a"] = NumericVector::create(1.0, 2.0, 4.0, 8.0);
    L["b"] = CharacterVector::create("alpha", "beta", "gamma", "delta");
    L["c"] = rnorm(4, 0.0, 1.0);

    L.attr("class") = "data.frame";
    L.attr("row.names") = IntegerVector::create(NA_INTEGER, -4); // 4 unnamed rows
    return L;
}

```

```
> createDF()
  a      b      c
1 1 alpha -0.2627742
2 2 beta  0.3077454
3 4 gamma 1.1554909
4 8 delta 1.7582734
```

Chapitre 5

Sucre syntaxique

All the examples are in the R package... Install it with

```
> devtools::install_github("introRcpp/introRcppSugar")
```

Load it with

```
library(introRcppSugar)
##
## Attaching package: 'introRcppSugar'
## The following object is masked from 'package:introRcppManipulation':
##
## countZeroes
```

La fonction R suivante fait un usage abondant de la vectorisation.

```
bonne.vectorisation <- function(x, y) {
  z <- 3*x + y
  if(any(x > 1))
    z <- z*2;
  sum( ifelse(z > 0, z, y) )
}
```

```
> set.seed(1); x <- rnorm(10); y <- rnorm(10)
> bonne.vectorisation(x,y)
[1] 26.99719
```

La transcription en C++ devrait faire intervenir trois boucles ; c'est un peu fastidieux. Le sucre syntaxique ajouté par les fonctions dites *Rcpp sugar* permet d'éviter de les écrire.

```
// file: fonction_sucree.cpp
#include <Rcpp.h>
using namespace Rcpp;
// [[Rcpp::export]]
double fonction_sucree(NumericVector x, NumericVector y) {
  NumericVector z = 3*x + y;
  if( is_true(any(x > 1)) )
```

```

    z = z*2;
    return sum(iffelse(z > 0, z, y));
}

```

```

> fonction_sucree(x,y)
[1] 26.99719

```

5.1 Efficacité

Grâce à une implémentation soignée, les fonctions Rcpp sugar sont redoutablement efficaces.

```

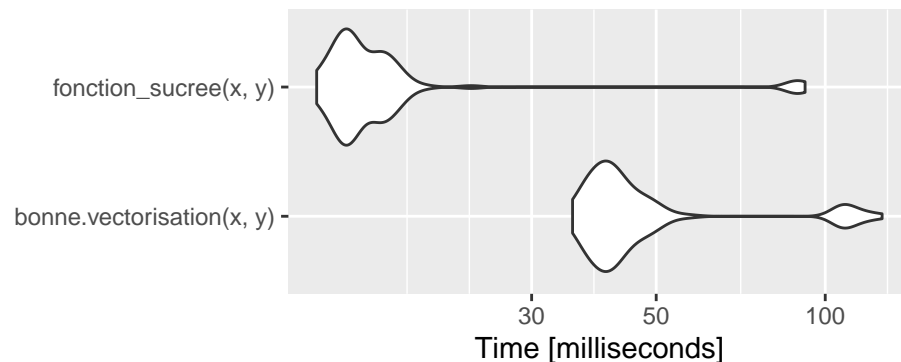
> x <- rnorm(1e6)
> y <- rnorm(1e6)
> mbm <- microbenchmark::microbenchmark( bonne.vectorisation(x,y), fonction_sucree(x,y) )
> mbm
Unit: milliseconds
      expr      min       lq     mean   median      uq      max neval
bonne.vectorisation(x, y) 35.48393 39.12556 50.39170 41.85803 47.08793 126.27349   100
fonction_sucree(x, y) 12.42497 13.77391 18.66095 14.52961 16.34120  92.06757   100

```

```

> ggplot2::autoplot(mbm)

```



Revenons cependant à notre exemple de comptage de 0 dans un vecteur.

```

// file: countZeroesSugar.cpp
#include <Rcpp.h>
using namespace Rcpp;
// [[Rcpp::export]]
int countZeroesSugar(IntegerVector x) {
    return sum(x == 0);
}

```

Comparons cette solution à celle proposée au chapitre précédent.

```

> set.seed(1); a <- sample(0:99, 1e6, TRUE)
> sum(a == 0);
[1] 10017

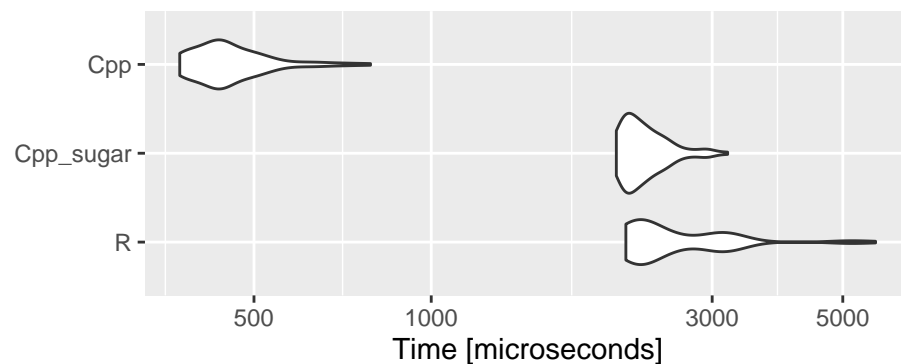
```

```
> countZeroesSugar(a);
[1] 10017
```

```
> countZeroes(a);
[1] 10017
```

```
> mbm <- microbenchmark::microbenchmark( R = sum(a == 0), Cpp_sugar = countZeroesSugar(a), Cpp = countZeroes(a))
> mbm
Unit: microseconds
      expr      min       lq      mean    median       uq      max  neval
  R      2140.705 2233.0190 2648.2467 2354.938 3037.8375 5684.324   100
Cpp_sugar 2062.360 2146.0630 2315.6037 2254.192 2420.7570 3187.149   100
  Cpp      374.034  412.1905  461.0874  440.178  490.8055  788.656   100
```

```
> ggplot2::autoplot(mbm)
```



On le voit, la fonction qui utilise le sucre syntaxique, bien que toujours très efficace, n'atteint pas toujours la performance d'une fonction plus rustique.

5.2 Un exemple de la Rcpp Gallery

Un exemple tiré de la Rcpp Gallery <http://gallery.rcpp.org/articles/simulating-pi/> (estimation de π par la méthode de Monte-Carlo) et la variante avec une boucle.

```
// file: pi_sugar.cpp
#include <Rcpp.h>
using namespace Rcpp;
// [[Rcpp::export]]
double pi_sugar(const int N) {
  NumericVector x = runif(N);
  NumericVector y = runif(N);
  // NumericVector d = sqrt(x*x + y*y);
  NumericVector d = x*x + y*y;
  return 4.0 * sum(d < 1.0) / N;
}

// [[Rcpp::export]]
```

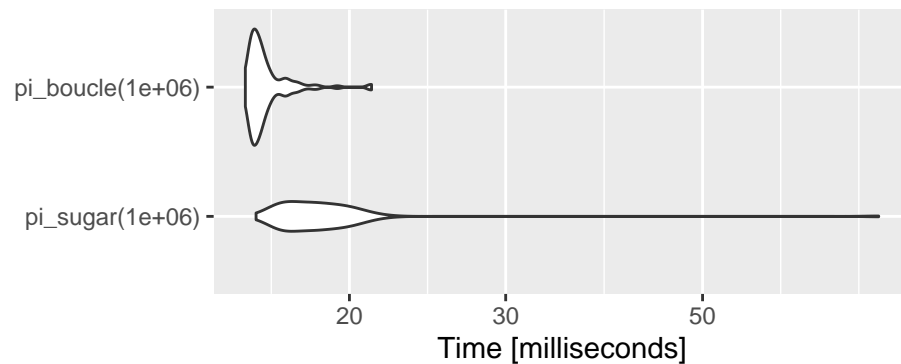
```
double pi_boucle(const int N) {
  int S = 0;
  for(int i = 0; i < N; i++) {
    double x = R::runif(0, 1);
    double y = R::runif(0, 1);
    S += (x*x + y*y) < 1.0; // cast implicite bool vers int
  }
  return (4.0 * (double) S / (double) N);
}
```

```
> pi_sugar(1e6)
[1] 3.14262
```

```
> pi_boucle(1e6)
[1] 3.141956
```

```
> mbm <- microbenchmark::microbenchmark(pi_sugar(1e6), pi_boucle(1e6))
> mbm
Unit: milliseconds
      expr      min       lq      mean   median      uq      max neval
pi_sugar(1e+06) 15.69809 16.94278 18.90107 18.20033 19.47547 78.97116   100
pi_boucle(1e+06) 15.26719 15.57637 16.12589 15.81448 16.20822 21.18206   100
```

```
> ggplot2::autoplot(mbm)
```



Chapitre 6

Exemple : Metropolis-Hastings

Install with

```
> devtools::install_github("introRcpp/introRcppSugar")
```

Load with

```
library(introRcppMetropolis)
```

6.1 L'algorithme

L'algorithme de Metropolis-Hastings permet de faire des tirages aléatoires dans une loi de densité proportionnelle à une fonction $\pi(x)$ positive – il n'y a pas besoin que $\int \pi(x)dx = 1$, autrement dit, on n'a pas besoin de connaître la constante de normalisation.

Nous présentons tout d'abord la notion de marche aléatoire, puis l'algorithme de Metropolis-Hastings.

6.1.1 Marche aléatoire

Une suite de valeurs aléatoires $x_1, x_2, \dots \in \mathbb{R}^d$ est une marche aléatoire¹ si chaque point x_{t+1} est tiré dans une loi dont la densité ne dépend que x_t . On pourra noter $q(x|x_t)$ cette densité.

Un exemple simple est la marche aléatoire gaussienne : la densité $q(x|x_t)$ est la densité d'une loi normale de variance $\sigma^2 I_d$ et d'espérance x_t . Cela revient à dire que

$$x_{t+1} = x_t + z$$

avec z tiré dans une loi normale centrée de variance $\sigma^2 I$.

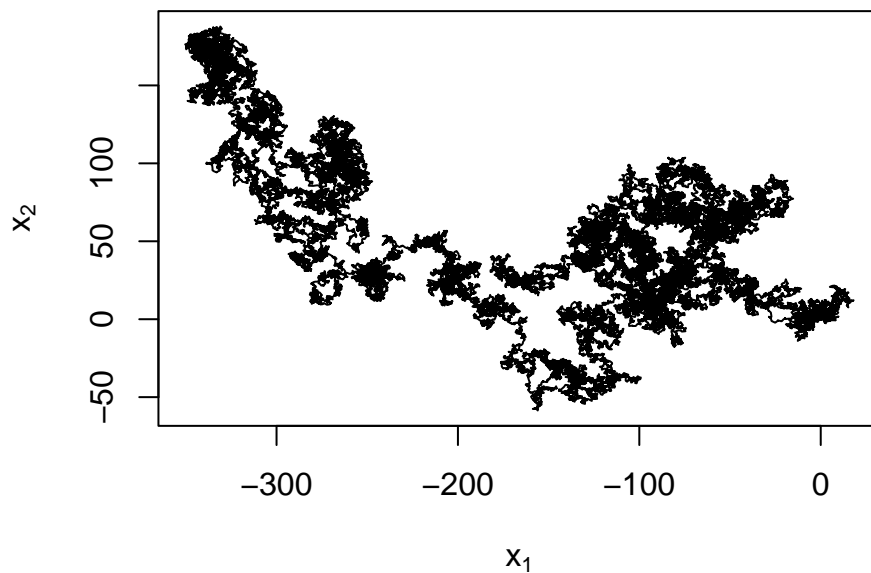
La fonction suivante permet d'illustrer ceci avec $d = 2$. Elle réalise B étapes d'une marche aléatoire dont le point de départ est $x_1 = (0,0)$. Le résultat est présenté sous la forme d'une matrice à B lignes et deux colonnes. Le paramètre `sd` permet de spécifier la valeur de σ .

1. On pourra trouver d'autres définitions pour « marche aléatoire ». La définition donnée ici est celle d'une chaîne de Markov dite « homogène » ou parfois « stationnaire ».

```

Marche <- function(B, sd) {
  R <- matrix(0.0, nrow = B, ncol = 2)
  x <- R[1,]
  for(b in 2:B) {
    x <- x + rnorm(2, 0, sd = sd)
    R[b, ] <- x
  }
  return(R);
}
X <- Marche(5e4, sd = 0.8)
plot(X[,1], X[,2], xlab = expression(x[1]), ylab = expression(x[2]), type = "l")

```



6.1.2 L'algorithme

Voici l'algorithme pour faire des tirages dans une loi de densité proportionnelle à une fonction positive $\pi(x)$, définie sur \mathbb{R}^d . On part d'un point x_1 arbitraire, ou bien tiré au hasard dans une loi bien choisie. Supposons qu'on a $x_t \in \mathbb{R}^d$. On va tirer x_{t+1} en s'aidant d'une marche aléatoire de la façon suivante :

1. On génère une valeur y en faisant "un pas de marche aléatoire depuis x_t ", autrement dit en tirant y dans la loi de densité $q(x|x_t)$.

2. On calcule

$$\rho = \frac{\pi(y)q(x_t|y)}{\pi(x_t)q(y|x_t)}.$$

3. Si $\rho \geq 1$, on pose $x_{t+1} = y$; sinon, $x_{t+1} = y$ avec probabilité ρ et $x_{t+1} = x_t$ avec probabilité $1 - \rho$.

La valeur y s'appelle « valeur proposée »; l'étape 3 consiste à décider si on accepte ou non la proposition. En pratique, on peut la réaliser ainsi

- On tire u dans la loi uniforme $U(0, 1)$
- Si $u < \rho$ on pose $x_{t+1} = y$ (on accepte y), et sinon $x_{t+1} = x_t$.

6.1.2.1 Cas particulier d'une marche symétrique

si pour tous x et y on a $q(x|y) = q(y|x)$ (la probabilité de faire un pas de y à x est la même que celle de faire un pas de x à y ; c'est le cas de la marche gaussienne donnée en exemple), alors on a simplement

$$\rho = \frac{\pi(y)}{\pi(x_t)}.$$

Dans ce cas, la valeur proposée y est toujours acceptée quand $\pi(y) > \pi(x_t)$, c'est-à-dire quand la marche aléatoire propose un point où la densité est plus grande qu'au point actuel.

6.1.2.2 Les propriétés du résultat

Si t est assez grand, alors x_t est approximativement de loi de densité $\pi(x)$ (ou proportionnelle à $\pi(x)$).

On pourrait donc utiliser cette méthode avec $t = 4000$ (par exemple) pour générer une valeur dans la loi voulue, puis recommencer, etc. C'est très coûteux en temps de calcul ; en fait pour la plupart des applications on peut garder toutes les valeurs au-delà d'une certaine valeur de t . Elles ne sont pas indépendantes mais cela n'est pas très gênant.

L'opération, souvent nécessaire, qui consiste à supprimer les premières valeurs (par exemple les 4000 premières) s'appelle le *burn-in*. Si il est important que les valeurs échantillonnées soient indépendantes, on peut s'en approcher en ne gardant, par exemple, qu'une valeur toutes les 100 itérations. Cette opération s'appelle le *thinning*.

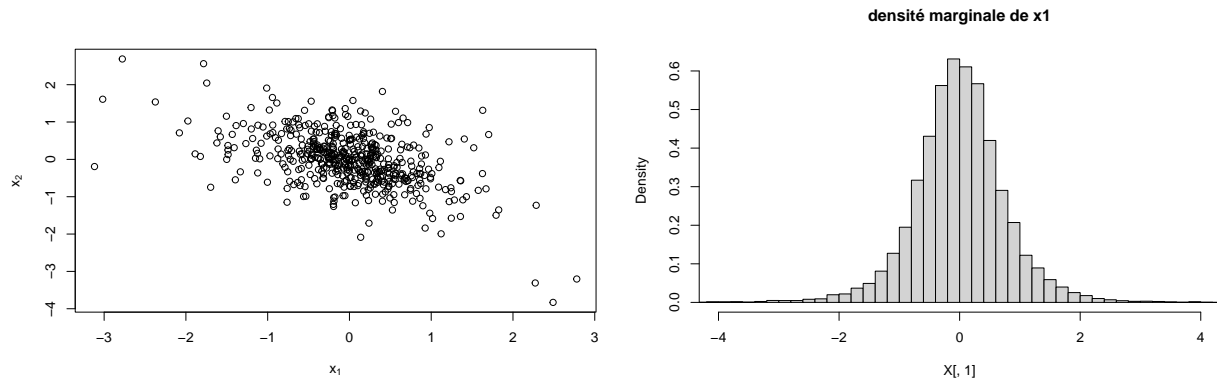
6.1.3 Application

On prend pour $x = (x_1, x_2)$, $\pi(x) = (1 + x_1^2 + x_1 x_2 + x_2^2)^{-3}$, et on utilise une marche aléatoire gaussienne comme celle présentée plus haut, qui est une marche symétrique : la formule simplifiée ci-dessus peut être utilisée.

L'implémentation en R n'est pas difficile:

```
PI <- function(x) (1 + x[1]**2 + x[1]*x[2] + x[2]**2)^(-3)
MH <- function(B, sd) {
  R <- matrix(0.0, nrow = B, ncol = 2)
  x <- R[1,]
  for(b in 2:B) {
    y <- x + rnorm(2, 0, sd = sd)
    rho <- PI(y) / PI(x)
    u <- runif(1)
    if(u < rho)
      x <- y
    R[b, ] <- x
  }
  return(R);
}
```

Voici un exemple de mise en œuvre :



6.2 Première version en C++

Une version obtenue en « traduisant » l'implémentation en R.

```
// file: Pi.cpp
#include <cmath>
double Pi(double x1, double x2) {
    return pow((1 + x1*x1 + x1*x2 + x2*x2), -3.0);
}
```

```
// file: MHcpp1.cpp
#include <Rcpp.h>
#include "Pi.h"
using namespace Rcpp;
//[[Rcpp::export]]
NumericMatrix MHcpp1(int B, double sd) {
    NumericMatrix R(B, 2);
    double x1 = 0.0, x2 = 0.0;
    for(int b = 1; b < B; b++) {
        double y1 = x1 + R::rnorm(0, sd);
        double y2 = x2 + R::rnorm(0, sd);
        double rho = Pi(y1, y2) / Pi(x1, x2);
        double u = R::unif_rand();
        if(u < rho) {
            x1 = y1;
            x2 = y2;
        }
        R(b, 0) = x1;
        R(b, 1) = x2;
    }
    return R;
}
```

6.3 Une version améliorée

Il est souhaitable d'éviter de recalculer $Pi(x_1, x_2)$ à chaque tour de boucle, alors que cette valeur est déjà connue.

```
// file: MHcpp2.cpp
#include <Rcpp.h>
#include "Pi.h"
using namespace Rcpp;

//[[Rcpp::export]]
NumericMatrix MHcpp2(int B, double sd, int burn = 0, int thin = 1) {
  NumericMatrix R(B, 2);
  thin = (thin < 1)?1:thin;
  double x1 = 0.0, x2 = 0.0;
  int b = 1;
  double pi_x = Pi(x1, x2);
  for(int k = 0; b < B ; k++) { // !! boucle exotique !!
    double y1 = x1 + R::rnorm(0,sd);
    double y2 = x2 + R::rnorm(0,sd);
    double pi_y = Pi(y1, y2) / Pi(x1, x2);
    double u = R::unif_rand();
    if(u * pi_x < pi_y) {
      x1 = y1;
      x2 = y2;
      pi_x = pi_y;
    }
    if(k > burn && (k % thin) == 0) {
      R(b,0) = x1;
      R(b,1) = x2;
      b++;
    }
    if((k % 1000) == 0) // toutes les mille itérations
      checkUserInterrupt();
  }
  return R;
}
```

Le paramètre `burn` permet de ne pas retenir les premières itérations ; le paramètre `thin` permet de ne retenir qu'une itération sur `thin` (pour réduire la dépendance entre les tirages successifs).

À noter : la fonction `checkUserInterrupt()` qui permet d'interrompre le programme en cas d'appui sur `ctrl + C`, ou sur le petit panneau `STOP` de R studio. On n'appelle pas cette fonction à chaque tour de boucle car elle est longue à exécuter !

À noter également : une boucle exotique, puisque la condition d'arrêt n'est pas sur le compteur de boucle `k`, mais sur `b`, qui est régulièrement incrémenté dans la boucle (mais, en général, pas à chaque tour).