Université Paris 8 - Vincennes à Saint-Denis

GL4D

Algorithmes pour la programmation graphique

Farès Belhadj

Date de MAJ : 17 septembre 2024

email : mailto:amsi@up8.edu
github : https://github.com/noalien/GL4Dummies
web [GL420] : https://gl4d.api8.fr

Table des matières

Liste des codes source

Chapitre 1

Introduction à la programmation graphique 2D

1.1 Mon `HelloWorld` *GL4Dummies*

Commençons par le premier *Sample Code* (code échantillon) présent dans les sources de la bibliothèque *GL4Dummies*. Il s'agit du projet situé dans `samples/sc_00_00_blank-1.0` que l'utilisateur peut compiler (sous un système Posix[1]) en se rendant dans le dossier et en saisissant la commande `make` ↵ puis, si tout se déroule correctement, lancer l'exécutable produit en saisissant `./blank` ↵ . Ce qui donne :

```
MacBook-Pro-de-Fares:GL4Dummies amsi$ cd samples/sc_00_00_blank-1.0/
MacBook-Pro-de-Fares:sc_00_00_blank-1.0 amsi$ ls
COPYING   Makefile  blank.sln blank.vcxproj documentation window.c
MacBook-Pro-de-Fares:sc_00_00_blank-1.0 amsi$ make
gcc -I. -I/usr/local/include -I/opt/local/include/SDL2 -D_THREAD_SAFE -Wall -O3 -mmacosx-version-min=10.8
     -c window.c -o window.o
gcc window.o -lm -L/usr/local/lib -framework OpenGL -mmacosx-version-min=10.8 -lGL4Dummies -L/opt/local/lib
     -lSDL2 -o blank
MacBook-Pro-de-Fares:sc_00_00_blank-1.0 amsi$ ./blank
OpenGL version: 4.1 NVIDIA-10.17.5 355.10.05.45f01
Supported shaders version: 4.10
GL4D/gl4du.c (344): Creation du programme 1 a l'aide des Shaders :
gl4dp_basic_with_transforms.vs : vertex shader
gl4dp_basic.fs : fragment shader
```

Les utilisateur de Visual Studio se contenterons d'ourir le fichier de la solution `blank.sln` de compiler (`F7`) et d'exécuter le programme (`ctrl-F5`).

Ainsi, une exécution réussie du *Sample Code* `sc_00_00_blank-1.0` ouvre une fenêtre de 320×240 pixels, portant le titre "GL4Dummies' Hello World" et affichant un fond noir telle qu'illustrée par la figure 1.1. Il est à noter que

1. Posix concerne tous les systèmes *Unix-Like* comprenant *Linux, FreeBSD, Mac OS X* et même l'utilisation de *cygwin* ou *mingw32* sous *Windows*. Par contre, si vous utilisez des IDE tels que *Code::blocks* ou *Visual Studio* voir les solutions présentes dans le dossier `Windows`.

cette fenêtre possède un bouton permettant sa fermeture, un autre pour la réduire et que le bouton permettant le redimensionnement (s'il est présent) n'est pas actif. L'application quitte (donc la fenêtre se ferme) si l'utilisateur clique sur le bouton fermer. Ses comportements sont programmés et le lecteur les découvrira au fur et à mesure. Enfin, notons que si l'application est lancée depuis un terminal des nombres apparaissent toutes les 5 secondes. Ces nombres correspondent au *Framerate* de l'application ; soit le nombre d'images par seconde qu'elle produit. Il est fréquent que ce nombre corresponde à 60 car classiquement les *drivers* (pilotes) de cartes graphiques bloquent la fréquence de rafraîchissement afin de la synchroniser avec celle de l'écran (télévision ou vidéo-projecteur) qui est souvent à $60Hz$. Enfin, en fonction du système et des pilotes fournis, il existe des outils permettant de désactiver cette **synchronisation verticale**.

FIGURE 1.1 – Résultat du *Sample Code* `sc_00_00_blank-1.0`

1.1.1 Le source `window.c` de `sc_00_00_blank-1.0`

Dans ce *Sample Code* le seul fichier strictement nécessaire à la fabrication du programme est `window.c`, il est listé dans le CODE SOURCE 1.1. Pour des raisons de lisibilité, nous avons supprimé les commentaires contenus dans le code téléchargeable et commenterons les principaux éléments de ce programme.


```c
#include <GL4D/gl4dp.h>
#include <GL4D/gl4duw_SDL2.h>
int main(int argc, char ** argv) {
  if(!gl4duwCreateWindow( argc, argv, "GL4Dummies'_Hello_World",
        10, 10, 320, 240, GL4DW_SHOWN) ) {
    return 1;
  }
  gl4dpInitScreen();
  gl4dpClearScreen();
  gl4dpUpdateScreen(NULL);
  gl4duwMainLoop();
  return 0;
}
```

Code source 1.1 – Code source du projet `sc_00_00_blank-1.0` : écran noir

Dans les grandes lignes, ce programme créé une fenêtre à l'aide de la fonction `gl4duwCreateWindow` ; créé, efface en noir puis met à jour un *screen* respectivement avec les fonctions `gl4dpInitScreen`, `gl4dpClearScreen` et `gl4dpUpdateScreen` ; et enfin se lance dans une boucle d'affichage infinie.

Le fichier *header* `gl4dp.h` contient les macros, structures et prototypes de fonctions liées aux primitives de dessin 2D ; la lettre **p** de `gl4dp.h` correspondant à **p**rimitives mais aussi à **p**édagogique car cette partie de la bibliothèque n'a pas pour vocation de proposer des outils de primitives optimisés mais possède une priorité pédagogique.

Le fichier *header* `gl4duw_SDL2.h` contient pour sa part les macros, structures et prototypes de fonctions liées à la gestion des fenêtres et à la gestion des fonctionnalités qui y sont liées.

La fonction `gl4duwCreateWindow` :

Cette fonction permet de créer une fenêtre pour *GL4Dummies* et initialise la bibliothèque. Sont prototype est le suivant :

```c
GLboolean gl4duwCreateWindow(int argc, char ** argv,
                             const char * title, int x, int y,
                             int width, int height, Uint32 wflags);
```

les deux premiers arguments proviennent des arguments du `main` et permettent à la bibliothèque d'initialiser son contexte (principalement utile pour connaître les chemin vers le binaire et pouvoir trouver les dépendances – comme les fichiers *shaders* – de manière relative). Le troisième argument est le titre de la fenêtre, il peut aussi servir à retrouver la fenêtre parmi plusieurs autres afin de lui affecter le statut "courante". `x, y, width` et `height` donnent la position et dimensions de la fenêtre lors de la création. `wflags` est un entier non signé permettant de stocker des options relatives à la fenêtre comme par exemple : est-elle redimensionnable, visible, ... Nous laisserons le lecteur découvrir plus de détails en le renvoyant sur la documentation de référence. Enfin, cette fonction revoie un booléen afin d'indiquer si la création de la fenêtre a réussi ou échoué. L'échec peut être causé par l'absence de contexte graphique ou l'impossibilité d'ouvrir un contexte OpenGL® 3.2 (valeur par défaut dans *GL4Dummies*, voir la fonction `gl4duwSetGLAttributes`).

Le *screen* et la fonction `gl4dpInitScreen` :

Le *screen* est un écran virtuel géré par *GL4Dummies* et représentant un tableau de données proportionnel aux dimensions de la fenêtre quand le *screen* est créé à l'aide de la fonction `gl4dpInitScreen` (voir aussi la fonction `gl4dpInitScreenWithDimensions` pour des *screens* aux dimensions différentes de la fenêtre). Ci-après le prototype des fonctions `InitScreen` :

```
GLuint gl4dpInitScreen(void);
GLuint gl4dpInitScreenWithDimensions(GLuint w, GLuint h);
```

Ces fonctions renvoient donc un identifiant de *screen* permettant, en cas de multiples *screens*, de passer de l'un à l'autre, afin d'effacer, dessiner, supprimer, ... Par ailleurs, la structure intrinsèque à un *screen* est simple, elle contient autant d'entiers non signés que de pixels. Pour faire simple, soit pour un *screen* de dimensions $w \times h$ la partie données du *screen* est comparable à un :

```
unsigned int data[w * h];
```

Nous inviton le lecteur à se rendre à la section 1.4 pour en savoir un peu plus sur ce qu'est un pixel, une de ses représentations simples adoptées dans la partie "pédagogique" (`gl4dp.h`) de *GL4Dummies*, et comment faire son premier programme créant un dégradé de pixels.

La fonction `gl4dpClearScreen` :

Cette fonction efface le *screen* en cours en y mettant des zéros (0). En pratique, cette fonction utilise un `memset` avec comme second argument `0` afin de remplir tous les octets de zéros ce qui produit un écran noir (les pixels contenant l'intensité de chaque couleur, l'omni-présence de zéros produit une image à intensité nulle donc noire). Pour un effacement avec une autre couleur voir la fonction `gl4dpClearScreenWith(Uint32 color)`.

La fonction `gl4dpUpdateScreen` :

Sans rentrer dans les détails, cette fonction permet de communiquer entre la mémoire centrale, la *RAM-CPU*, et la mémoire graphique, la *RAM-GPU*. La données est partiellement ou dans sa globalité transférée vers OpenGL® pour que son état actuel en *RAM-CPU* soit reproduit à l'écran. Ci-après le prototype de la fonction :

```
void gl4dpUpdateScreen(GLint * rect);
```

où `rect` représente le rectangle, sous partie du *screen*, à mettre à jour côté *GPU*. C'est le pointeur vers les quatre entiers positifs `x,y` – coin haut gauche du rectangle – et `w,h` – ses dimensions.

La fonction `gl4duwMainLoop` :

Enfin, nous revenons vers une fonction liée à la gestion du fenêtrage. Une application fenêtrée est un processus qui demeure *alive* (en quelques sortes "vivant") au sein du système tant qu'il ne reçoit pas d'événement ou de signal lui indiquant ou le forçant à quitter. Donc, par définition, dans ce type d'applications il est nécessaire de produire une boucle infinie [2] dont le corps est en attente d'un signal de sortie. Afin de ne pas accaparer les ressources du système cette boucle doit ordonnancer les tâches à faire pour permettre à la fois d'écouter les événements, réagir en fonction et procéder à l'affichage. C'est le rôle de la fonction `gl4duwMainLoop` dont nous abordons le principe générale dans la section 1.2 ci-après.

1.2 Principe de fonctionnement d'une application graphique

Le schéma donné Figure 1.2 illustre les grandes lignes du fonctionnement d'une application graphique. Une application graphique passe par la création d'au moins une fenêtre contenant un contexte graphique dans lequel des éléments graphiques sont dessinés ; il arrive qu'on interagisse avec ces derniers. Dans notre cas, il s'agit de créer une fenêtre donnant accès à un contexte OpenGL® dans lequel la bibliothèque (ses paramètres, ses données et ses fonctions) fonctionne.

Avant d'arriver à la boucle principale d'affichage, il est généralement utile de paramétrer les options de l'API graphique, parfois ses propres données initiales ainsi que les fonctions *callBack*. Concernant ces dernières, la boucle d'affichage est une boucle infinie dans la quelle entre le programme et où il passe son temps à gérer les événements avec l'utilisateur (via le clavier, la souris, ...), met éventuellement à jour les données puis redessine et rafraîchit l'affichage. Ceci peut ressembler à un code tel que :

```
for(;;) { /* le programme entre dans une boucle infinie */
  /* 1) s'il y a une fonction de gestion d'événements, l'appeler */
  /* 2) s'il y a une fonction pour MAJ des données, l'appeler */
  /* 3) s'il y a une fonction de dessin, l'appeler */
  /* 4) rafraichir la fenetre (SwapBuffers) */
}
/* ce point de code n'est jamais atteint */
/* on ne quitte la boucle infinie que par le biais d'un exit */
/* d'ou l'importance du atexit pour ajouter d'éventuelles fonctions a exécuter au moment du exit */
```

Les fonctions citées aux points (1), (2) et (3) peuvent être implémentées comme des fonctions dites de *callBack*[3] afin qu'elles soient appelées par la

2. À moins d'utiliser une sorte variable globale servant de test de boucle et passant à `faux` par le biais d'un événement extérieur.

3. Généralement, une fonction *callBack* est une fonction passée en argument d'une

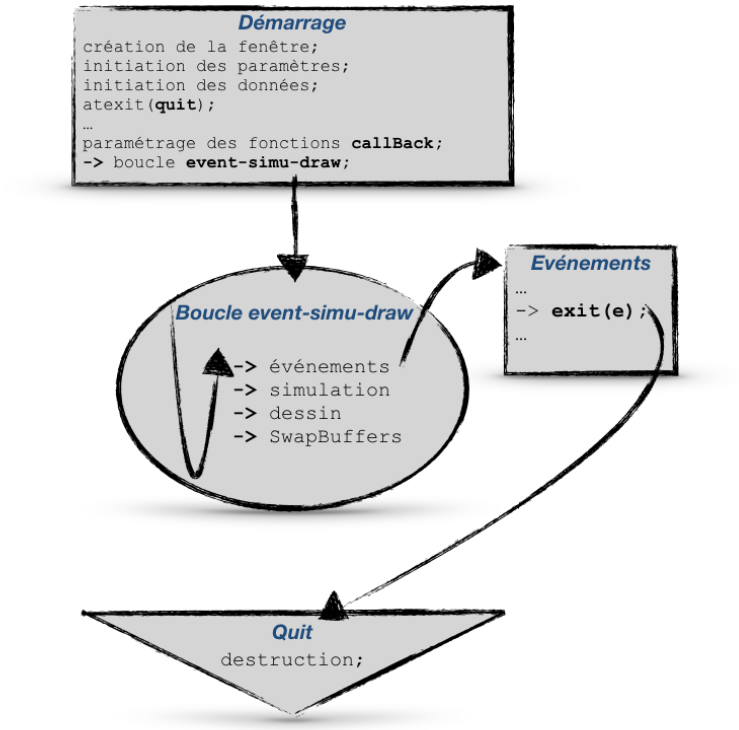


FIGURE 1.2 – Principe général du fonctionnement d'une application graphique avec la boucle événements–simulation–dessin

boucle principale d'affichage si elle prend la forme d'une fonction comme dans notre cas actuel, c'est à dire `gl4duwMainLoop()`. Ainsi, les principales fonctions de *callBack* peuvent être *settées*[4] par le biais de fonctions telles que :

`gl4duwKeyDownFunc` permet de *setter* la fonction à appeler en cas d'événement clavier *key down* ou "touche enfoncée" ;

`gl4duwKeyUpFunc` permet de *setter* la fonction à appeler en cas d'événement clavier *key up* ou "touche relâchée" ;

`gl4duwResizeFunc` permet de *setter* la fonction à appeler en cas de redimensionnement, par l'utilisateur, de la fenêtre si cette dernière est redimensionnable ;

`gl4duwMouseFunc` permet de *setter* la fonction à appeler en cas de click de souris dans la fenêtre ;

`gl4duwIdleFunc` permet de *setter* la fonction à appeler afin de mettre régulièrement (à chaque frame) à jour les données. Cette mise à jour correspond à une action souvent appelée "simulation" car elle sert à mettre à jour les données liées au(x) modèle(s) simulé(s) par l'application graphique ;

`gl4duwDisplayFunc` permet de *setter* la fonction à appeler afin de mettre à jour le "dessin" de chaque frame. C'est la fonction qui dessine sur le *buffer* courant ;

`gl4duwMotionFunc` permet de *setter* la fonction à appeler lorsque l'utilisateur déplace la souris dans la fenêtre tout en ayant un ou plusieurs boutons enfoncés ;

`gl4duwMotionFunc` permet de *setter* la fonction à appeler lorsque l'utilisateur déplace la souris dans la fenêtre sans qu'aucun bouton ne soit enfoncé.

1.3 Le `HelloWorld` multi-coloré

Dans le premier exemple d'application graphique (cf. CODE SOURCE 1.1) le programme créé une fenêtre, puis un écran aux dimensions de la fenêtre (*i.e.* `screen`), efface l'écran en noir et le met à jour. À partir de là, le programme entre dans une sa boucle – infinie – d'affichage sans avoir, au préalable, *setté* de fonction *callBack*. Ainsi, le résultat reste statique (rien de

autre fonction pour que cette dernière l'appelle si besoin. Nous pouvons aussi utiliser des variables "pointeurs de fonction" ainsi que des *Setters* (type de fonction qui a pour but de "set" une variable/propriété) pour les modifier.

4. Désolé pour cet anglicisme, mais je ne trouve pas de meilleur mot que *set* pour indiquer l'action de mettre une valeur à une variable/propriété.

nouveau ne se passe) jusqu'à ce que l'utilisateur décide de fermer la fenêtre.

Dans le CODE SOURCE 1.2 deux nouvelles fonctions font leur apparition : `quitte` et `dessine`. Nous pouvons remarquer que ces deux fonctions ne sont JAMAIS explicitement appelées, elles sont néanmoins présentent comme argument respectifs des fonctions `atexit` et `gl4duwDisplayFunc`, ce qui en fait des fonctions de *callBack*.

```c
#include <GL4D/gl4dp.h>
#include <GL4D/gl4duw_SDL2.h>

static void quitte(void) {
  gl4duClean(GL4DU_ALL);
}

static void dessine(void) {
  GLubyte r = rand() % 256, g = rand() % 256, b = rand() % 256;
  gl4dpClearScreenWith(RGB(r, g, b));
  gl4dpUpdateScreen(NULL);
}

int main(int argc, char ** argv) {
  if(!gl4duwCreateWindow(argc, argv, "GL4Dummies' Hello World",
      10, 10, 320, 240, GL4DW_SHOWN) ) {
    return 1;
  }
  gl4dpInitScreen();
  atexit(quitte);
  gl4duwDisplayFunc(dessine);
  gl4duwMainLoop();
  return 0;
}
```

Code source 1.2 – Code source du projet `sc_00_01_multicolorClear-1.0` : écran coloré changeant à chaque *Frame*

La fonction `atexit` dont voici un extrait du manuel (`man atexit`) :

```
ATEXIT(3)              BSD Library Functions Manual              ATEXIT(3)

NAME
     atexit -- register a function to be called on exit

SYNOPSIS
     #include <stdlib.h>

     int
     atexit(void (*function)(void));

     int
     atexit_b(void (^function)(void));

DESCRIPTION
     The atexit() function registers the given function to be called at program exit, whether via exit(3) or via
     return from the program's main(). Functions so registered are called in reverse order; no arguments are passed.

     If the provided function is located in a library that has been dynamically loaded (e.g. by dlopen()), it will
     be called when the library is unloaded (due to a call to dlclose()) or at program exit.

     The atexit_b() function is like atexit() except the callback is a block pointer instead of a function pointer.

       Note: The Block_copy() function (defined in <Blocks.h>) is used by atexit_b() to make a copy of the block,
       especially for the case when a stack-based block might go out of scope when the subroutine returns.

       These functions must not call exit(); if it should be necessary to terminate the process while in such a
       function, the _exit(2) function should be used.  (Alternatively, the function may cause abnormal process
       termination, for example by calling abort(3).)

       At least 32 functions can always be registered, and more are allowed as long as sufficient memory can be
       allocated.

RETURN VALUES
     The atexit() and atexit_b() functions return the value 0 if successful; otherwise the value -1 is returned and
     the global variable errno is set to indicate the error.

ERRORS
     [ENOMEM] No memory was available to add the function to the list.  The existing list of functions is unmodified.

SEE ALSO
     exit(3)

STANDARDS
     The atexit() function conforms to ISO/IEC 9899:1990 (``ISO C90'').

BSD                          September 6, 2002                          BSD
```

est une fonction système qui permet d'empiler des *callBacks* à exécuter (de la dernière empilée à la première) suite à un `exit` rencontré n'importe où dans le code, ou à un `return` au sein du `main`. Ainsi la fonction `quitte` n'est appelée qu'au moment où l'utilisateur ferme la fenêtre de l'application ; ceci peut être vérifié en ajoutant un *print* dans le corps de la fonction ou en ajoutant un *breakpoint* et en exécutant le programme en mode *Debug*. Elle contient l'instruction `gl4duClean(GL4DU_ALL);` qui appelle la fonction *GL4Dummies* libérant les ressources utilisées par la bibliothèque.

Concernant la fonction `dessine`, il faut comprendre que la conséquence de l'appel `gl4duwDisplayFunc(dessine);` l'affecte comme fonction *callBack* à appeler à chaque fois que la boucle principale d'affichage (représentée par le `gl4duwMainLoop();`) dessine une nouvelle *frame*. Elle a pour objectif de sélectionner aléatoirement [5] une intensité entre 0 et 255 (à cause du modulo "%" 256) et l'affecte à l'octet non signé (*i.e.* `GLubyte`) `r` – pour *red* – puis `g`

5. En pratique, la fonction `rand` renvoie une série de nombres pseudo-aléatoires compris entre 0 et `RAND_MAX`. Voir le manuel pour plus de détails.

– pour *green* – et enfin `b` – pour *blue*. Le triplet `(r, g, b)` est transformé en entier non signé 32 bits représentant la couleur RGB qui correspond à ces trois intensités (synthèse additive de couleurs). C'est la macro `RGB` qui réalise le codage sur 32 bits de la couleur, sa définition se trouve dans le fichier `gl4dp.h` et nous donnerons plus de détails sur cette représentation dans la section suivante.

Ainsi cette couleur est transmise à la fonction `gl4dpClearScreenWith` qui s'en sert pour effacer l'écran qui n'est rien de plus qu'une zone mémoire de $320 \times 240 = 76800$ entiers 32 bits en RAM-CPU [6]. Pour que cet "écran" s'affiche, une **synchronisation** est nécessaire avec la mémoire GPU et ceci est fait à l'aide de l'appel `gl4dpUpdateScreen(NULL);` qui transfert l'ensemble [7] de la mémoire-écran depuis la RAM-CPU vers la RAM-GPU.

1.4 Le `HelloPixels` avec *GL4Dummies*

Cette section a pour premier objectif de donner quelques notions de base de la représentation des pixels, donc des couleurs, en mémoire. Elle se termine par un exemple simple de création d'un dégradé de niveaux de gris appliqué à une représentation RGBA 32 bits.

1.4.1 Modèles de représentation des couleurs en mémoire

Sans être exhaustifs, nous reprenons dans la Figure 1.3 les modèles classiques de représentation d'un pixel [8] en mémoire. Le quasi point commun entre tous ces modèles est que chaque élément représente une quantité numérique qui indique un degré d'intensité. Cela peut être l'intensité de blanc,

6. Pour faire simple, la RAM-CPU est la mémoire vive utilisée par le processeur central de la machine. Cette distinction est faite par opposition à la RAM-GPU qui est la mémoire vive appartenant et utilisée par la carte graphique de la machine.

7. Le paramètre qui ici vaut `NULL` indique que nous ne souhaitons pas transférer une sous-partie de la zone mémoire mais bien l'ensemble de cette zone. Quand ce paramètre est un pointeur valide vers un rectangle (pointeur vers quatre entiers consécutifs représentant respectivement (x, y) et (w, h) coin supérieur-gauche et largeur-hauteur du rectangle) seul la zone délimitée par ce rectangle est mise à jour depuis la RAM-CPU vers la RAM-GPU. Ceci peut-être utile quand peu de zones changent à l'écran, réduisant ainsi les transferts CPU-GPU. Ce cas se présente par exemple lors d'un usage optimal de *sprites* qui se déplacent à l'écran.

8. Pixel est la contraction de *picture* et *element*, il est donc la brique de base compasant une image numérique sur un format matriciel, c'est-à-dire sous la forme d'une grille.

donc le niveau de gris, ou en séparant la lumière en somme de trois composantes primaires (le rouge, le vert et le bleu), l'intensité de chaque composante. Le seul modèle présenté ici et qui déroge à la règle est le modèles de couleurs indexées (le troisième de la Figure 1.3 en partant du haut). En effet, dans ce cas la valeur indiquée dans un pixel ne correspond pas à une intensité mais à l'indice, dans un autre tableau appelé LUT (pour *Look Up Table*), auquel nous trouvons la ou les intensités correspondant à ce numéro de couleur ; une analogie peut être faite avec le jeu pour enfants *draw by numbers*.

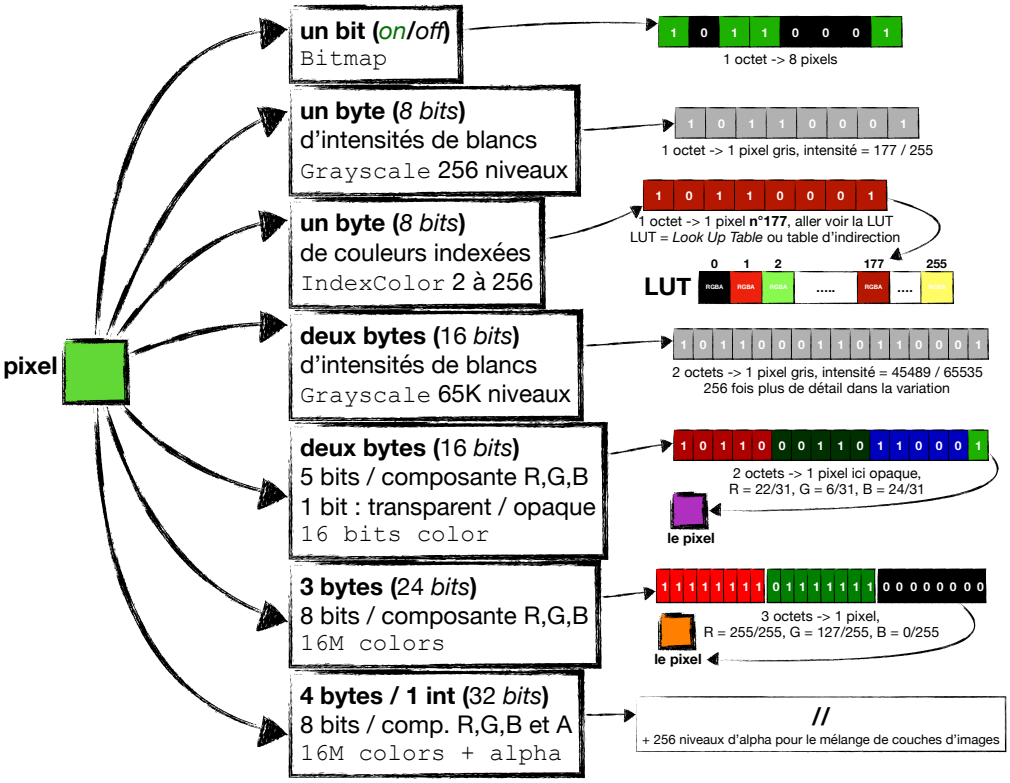


FIGURE 1.3 – Quelques modèles classiques de représentation d'un pixel (ou couleur) en mémoire.

Donnons quelques détails sur les différents modèles présentés Figure 1.3 :

Bitmap : est en un sens l'ancêtre du *PixMap* (abréviation de *pixel map*). Ce modèle est donc une *map* (carte ou simplement tableau qui cartographie une image matricielle) de bits indiquant à chaque position si cette dernière est allumée – *on* ou éteinte – *off* ; ce qui était suffisent

pour les premiers modèles d'écrans qui étaient monochromes. Côté mémoire, c'est donc une suite d'octets (ou *bytes*) où chacun représente 8 points consécutifs, de gauche à droite, à l'écran. Dès que nous arrivons à la fin d'une ligne, les octets suivants représentent la ligne d'après (celle du bas), puis ainsi de suite jusqu'à arriver à la fin de l'image (généralement en bas à droite) ;

GrayScale-256 : Appelée aussi image en niveaux de gris. Ce modèle cherche à coder l'intensité de blanc en chaque pixel, ce qui peut aussi se rapporter à la notion de luminance de chaque pixel. C'est donc un modèle simple où l'octet stocke une valeur numérique de 0 à 255 correspondant à une intensité par pixel – 0 intensité minimale ou noir, 255 intensité maximale ou blanc.

IndexColor : Ce modèle peut être généralisé au codage indexé pour un nombre de couleurs quelconques. Prenons le cas le plus simple, chaque octet est un pixel, et la valeur dans l'octet n'indique aucunement une intensité mais plutôt un indice dans un "autre" tableau contenant 256 éléments où chacun est une couleur codée en plus d'un octet, comme par exemple en "vraies" couleurs 24 bits ou 16 millions de couleurs (sinon ça n'aurait aucun intérêt). Un format répandu utilisant ce modèle est le *GIF*.

GrayScale-65536 : Est un modèle équivalent au *GrayScale-8-bits* sauf que les nuances de gris sont codées sur 16 bits, soit 2 octets, pour plus de finesse [9] dans les variations d'intensité ;

16-bits-colors : Ce modèle tend à être de moins en moins répandu. Il est souvent lié à une limitation matérielle (couleurs gérées par l'écran et quantité mémoire) que nous pouvions retrouver sur les premiers modèles de *Smatphones*, des *devices* portables tels que la *Nintendo DS* ou même encore certains modèles "haut de gamme" de micro-ordinateurs [10] ou parmi les premières générations de consoles de jeux.

9. Cette finesse dans la variation n'est pas forcément nécessaire pour la perception humaine. Par le passé, il y avait même certaines études qui annonçaient que 32 à 64 niveaux de gris étaient des bonnes bornes supérieures pour un rendu sur un dispositif d'affichage (*i.e.* écran), qu'au delà l'humain ne distinguait pas les variations. Ceci est relativement faux, car les dispositifs d'affichage se sont bien améliorés depuis et 256 niveaux de gris est plutôt une borne inférieure raisonnable. En pratique, nous percevons mieux les variations dans les tons sombres et une échelle linéaire sur les 256 nuances montre des défauts liés au manque de nuances. Par ailleurs, une image n'a pas nécessairement pour vocation d'être directement "vue" par l'œil humain, elle peut contenir plus de détails que ce que nous pouvons percevoir – prenons pour exemple des captures d'imagerie médicale ou astronomique – et ces détails peuvent être révélés par le biais de filtres de traitement d'images.

10. L'avènement des micro-ordinateur coïncide avec l'époque où la grande majorité des

Les 16 bits étaient exploités de la manière suivante : 5 bits pour le rouge, 5 bits pour le vert, 5 bits pour le bleu et 1 bit pour indiquer si le pixel est transparent ou opaque (très utile pour utiliser des *sprites* dont les frontières ne sont pas nécessairement rectangulaires). Ce format permet donc d'avoir 32 nuances d'intensité par composante pour un total de 32768 couleurs.

16 millions de couleurs : Ce modèle et le suivant sont les plus classiques, même si, avec le temps, ils laisseront probablement la place à des modèles plus "riches" en terme bit par composante – donc de nuances par composante. Ici, le pixel comprend un octet par composante, donc 8 bits pour le rouge, 8 bits pour le vert et 8 bits pour le bleu pour un total de 24 bits soit $2^{24} = 16M$ de couleurs.

RGBA sur 32 bits : Le format précédent était idéal pour la majorité des dispositifs d'affichage qui permettaient l'affichage de 16 millions de couleurs. Par contre, stocker les pixels par lots de 3 octets n'est pas optimal par rapport aux architectures machines. En effet, sur une architecture 32-bits, il est plus optimal de parcourir ou de réaliser une opération sur un `int` 32-bits que d'en faire 3 ou 4 sur 3 ou 4 octets. Ainsi, il est préférable de stocker les 24 bits du format RGB ci-dessus dans un `int` 32-bits. Et étant donné qu'il reste 8 bits de libres, autant les utiliser ; d'où la composante alpha qui est rajoutée et qui permets de stocker 256 niveaux d'opacité par pixel. Ceci donne la possibiliter d'avoir plusieurs "couches" (ou *layers*) par image, chacune étant elle-même une image et l'ensemble représentant une composition formée de ces "couches".

Remarque : Il est possible d'utiliser plus d'un octet par composante, comme par exemple utiliser un flottant pour chaque composante, soit 32 bits par composante et un total de 128 bits par pixel. C'est notamment un cas facilement géré par les GPUs car ces dernières ont pour format natif le `vec4` qui est un vecteur de 4 flottants, et les bus de communication entre CPU et GPU ont actuellment une largeur au moins égale à 128 bits.

1.4.2 Cas simplifié de la sous-bibliothèque `gl4dp`

Un sous-ensemble de la bibliothèque *GL4Dummies* sert à se familiariser avec la manipulation d'images dans un format simple avant d'aborder des formes plus générales de représentation ou encore aborder des notions

machines grand-public étaient 8-bits. Les modèles 16-bits faisaient donc partie du haut de gamme de l'époque.

liées à OpenGL®et aux *Shaders*. Ce sous-ensemble de fonctions et de macros est regroupé dans le fichier `gl4dp.h` (et par extension dans le fichier source `gl4dp.c` mais ce dernier concerne l'implémentation et n'est pas utile pour la compréhension des éléments à venir).

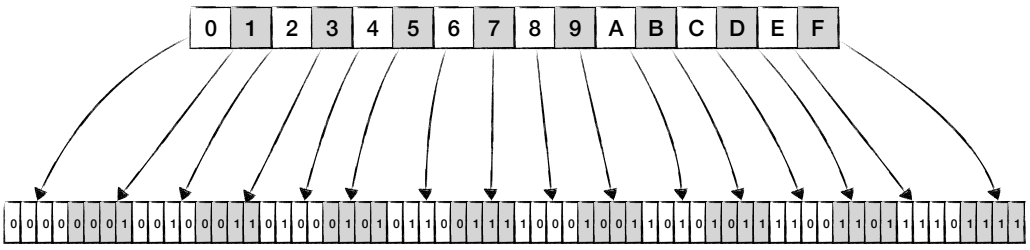
Dans `gl4dp`, nous avons fait le choix de n'avoir qu'un seul modèle de représentation de couleurs. Une couleur est donc un entier non-signé 32 bits, et un `screen` est une image, donc un tableau composé de plusieurs couleurs – autant que la largeur × la hauteur de l'image – que nous pouvons afficher à la fenêtre. Un `screen` peut avoir des dimensions différentes de celles de la fenêtre.

Le format choisi est donc le RGBA 32-bits, ce qui signifie que chaque case de l'image (ou du tableau) est un entier non signé de 32 bits. Ainsi dans le code suivant :

```
Uint32 img[] = {
  0xFF0000FF, 0x00FF00FF, 0x0000FFFF,
  0xFFFF00FF, 0x00FFFFFF, 0xFF00FFFF
};
```

nous pouvons imaginer que `img` est une image de 3×2 pixels dont les couleurs sont respectivement (de gauche à droite et de haut en bas) : rouge, vert, bleu, jaune, cyan et magenta. Pour information, le type `Uint32` est lié à *GL4Dummies* et aussi à *SDL2* et garantit la création d'un entier non signé (`U` ou Unsigned) dont la taille en bits est de 32.

Pour rappel, en hexadécimal un chiffre $(0, 1, 2, ..., 9, A, B, C, D, E, F$ oui il y en a 16) donne lieu à 16 possibilités. En faisant l'analogie avec le binaire, il faut avoir 4 chiffres (ou cases) binaires pour pouvoir représenter 16 possibilités, car $2^4 = 16$. Le schéma ci-après donne cette première correspondance :



La Figure 1.4 donne une schématisation d'une représentation mentale et mémoire correspondant au code de la *data* `img` donnée ci-dessus. En pratique dans ce cas nous avons ajouté une ligne telle que :

```
Uint8* p = (Uint8 *)img;
```


Ici `Uint8` est un *byte* (donc un octet et aussi 8 bits) non signé. Donc `p` est un pointeur vers `img` mais à la différence de cette dernière `p` la voit comme une succession d'octets et non d'entiers 32-bits. Par exemple, `p[0], p[1], p[2]` et `p[3]` sont les quatre octets qui, concaténés, représentent `img[0]`.

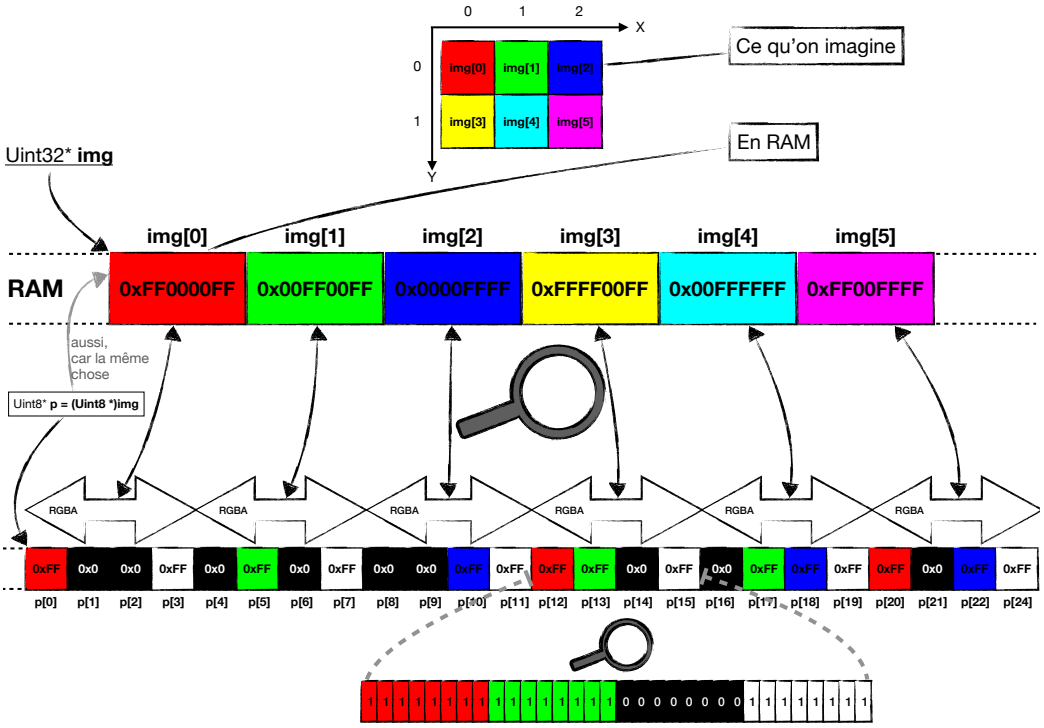


FIGURE 1.4 – Zooms sur la mémoire d'une image RGBA-32-bits de 3×2. Attention ici le *Endianness* n'est pas traité, nous considérons que nous sommes dans une configuration *Big-endian*.

Maintenant si nous souhaitons afficher, à l'aide d'un *print*, la valeur hexadécimale de, par exemple, `img[3]` nous pouvons le faire directement via `img[3]` ou indirectement via `p[12], p[13], p[14]` et `p[15]`. Voici un bout de code [11] – CODE SOURCE 1.3 – qui le fait pour notre exemple :

11. Ce code est plus ou moins complet car l'ordre n'est pas toujours respecté selon que l'architecture machine de la machine l'exécutant est *Little-endian* ou *Big-endian*.

```c
#include <stdio.h>  /* pour la fonction printf */
#include <stdint.h> /* pour les types standards uint32_t (comme Uint32) et uint8_t (comme Uint8) */
                    /* n'hesitez a m'avertir si cet include n'est pas present dans vos bibliotheques
                         standards */
int main(void) {
  uint32_t img[] = {
        0xFF0000FF, 0x00FF00FF, 0x0000FFFF,
        0xFFFF00FF, 0x00FFFFFF, 0xFF00FFFF
  };
  uint8_t * p = (uint8_t *)img;
  printf("img[3] -> %08x\n", img[3]);
  printf("concatenation de p[12], p[13], p[14] et p[15] -> %02x%02x%02x%02x\n", p[12], p[13], p[14], p[15]);
  printf("Alors ? quel Boutisme (ou Endianness) ?\n");
  return 0;
}
```

Code source 1.3 – Récupérer de deux manières la même couleur.

Or, l'exécution de ce code sur notre machine équipée d'un processeur *Intel i7* ne donne pas réellement le résultat escompté. Voici la trace :

```
$ gcc -Wall code_rgba_zoom_memoire.c && ./a.out
img[3] -> ffff00ff
concatenation de p[12], p[13], p[14] et p[15] -> ff00ffff
Alors ? quel Boutisme (ou Endianness) ?
```

Nous remarquons que la concaténation des quatre octets a donné un résultat correspondant au mirroir du nombre stocké dans l'entier ; comme si au lieu d'avoir RGBA nous avons produit ABGR (vous pouvez vous en assurer en utilisant une autre valeur pour `img[3]` telle que `0x1A2B3C4D`). Ceci est dû au fait que le *Boutisme*[12] ou *Endianness*[13] de notre architecture *Intel* est de type *Little-endian*, c'est-à-dire que les octets d'un entier sont placés de gauche à droite du plus faible au plus fort, ce qui est contre-intuitif car inverse à l'ordre des bits dans un octet où le bit de poids fort est à gauche, et en allant vers la droite, nous rencontrons des bits de poids plus en plus faibles jusqu'au bit de faible, complètement à droite. Aussi, lors d'un cours d'informatique, l'enseignant au tableau a plus tendance à naturellement utiliser la représentation *Big-endian*.

La Figure 1.5 résume la problématique liée à gestion de la différence entre une architecture *Big-endian* ou *Little-endian* ; ici nous l'illustrons avec le besoin d'extraire la composante verte d'une couleur mais le problème se présente aussi lors de l'écriture ou la modification d'une composante (plus généralement la composition d'une couleur à l'aide de ses composantes).

Ainsi, à titre informatif nous donnons dans le Code source 1.4 comment peuvent être définies des fonctions ou (ici) des macros pour pouvoir

12. Personnellement, je trouve que le terme choisi en français est ridicule. Ca ne doit pas vous empêcher de jeter un œil à la doc :
`https://fr.wikipedia.org/wiki/Boutisme`

13. C'est plus joli en anglais :)
`https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Endianness`

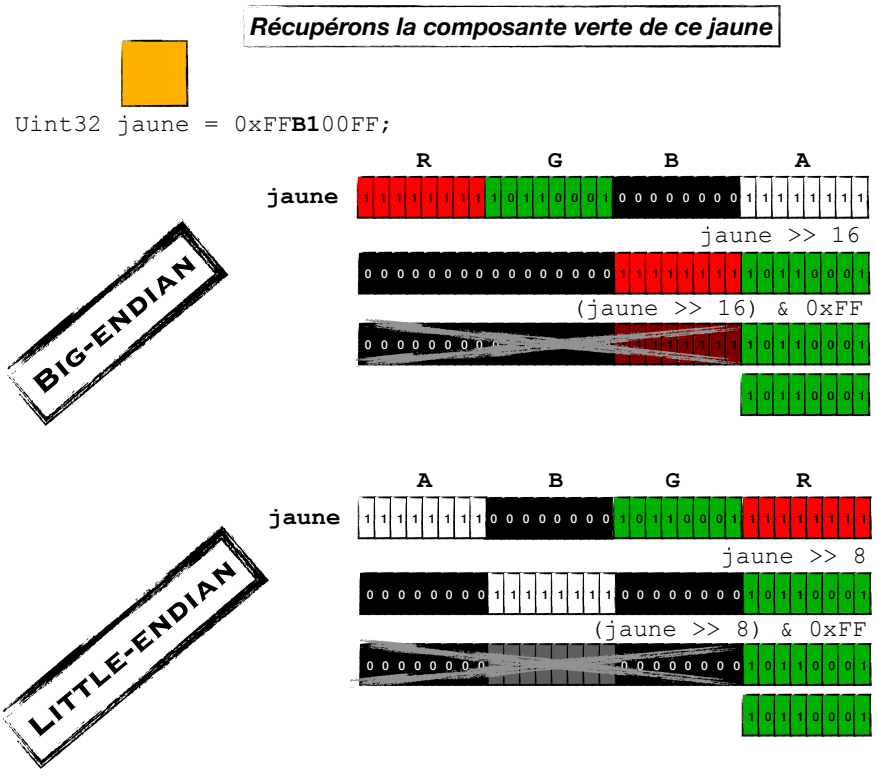


FIGURE 1.5 – Exemple d'extraction d'une composante (ici la verte) selon l'*Endianness* de l'architecture.

lire ou écrire une composante dans une couleur. Ce code prend automatiquement en compte la détection du type d'architecture en terme d'*Endianness*, pour cela il utilise la macro `SDL_BYTEORDER` fournie de manière homogène et multiplateforme par la bibliothèque *SDL2*.

```
#if SDL_BYTEORDER == SDL_BIGENDIAN
/*!\brief décalage pour la composante rouge */
#  define R_SHIFT 24
/*!\brief décalage pour la composante verte */
#  define G_SHIFT 16
/*!\brief décalage pour la composante bleue */
#  define B_SHIFT  8
/*!\brief décalage pour la composante alpha */
#  define A_SHIFT  0
/*!\brief masque pour la composante rouge */
#  define R_MASK 0xff000000
/*!\brief masque pour la composante verte */
#  define G_MASK 0x00ff0000
/*!\brief masque pour la composante bleue */
#  define B_MASK 0x0000ff00
/*!\brief masque pour la composante alpha */
#  define A_MASK 0x000000ff
#else
/*!\brief décalage pour la composante rouge */
#  define R_SHIFT  0
/*!\brief décalage pour la composante verte */
#  define G_SHIFT  8
/*!\brief décalage pour la composante bleue */
#  define B_SHIFT 16
/*!\brief décalage pour la composante alpha */
#  define A_SHIFT 24
/*!\brief masque pour la composante rouge */
#  define R_MASK 0x000000ff
/*!\brief masque pour la composante verte */
#  define G_MASK 0x0000ff00
/*!\brief masque pour la composante bleue */
#  define B_MASK 0x00ff0000
/*!\brief masque pour la composante alpha */
#  define A_MASK 0xff000000
#endif
/*!\brief macro qui convertie un r, un g, un b et un a en couleur Uint32 rgba */
#define RGBA(r, g, b, a) (((Uint32)(Uint8)(r)) << R_SHIFT | \
        ((Uint32)(Uint8)(g)) << G_SHIFT | \
        ((Uint32)(Uint8)(b)) << B_SHIFT | \
        ((Uint32)(Uint8)(a)) << A_SHIFT )
/*!\brief macro qui convertie un r, un g et un b en couleur Uint32 rgba dont l'alpha est `a 255 */
#ifdef RGB //FOR MSVC
#undef RGB
#endif
#define RGB(r, g, b) RGBA(r, g, b, 255)
/*!\brief macro permettant d'extraire une composante en utilisant l'argument \a shift */
#define EXTRACT_COMP(coul, shift) ((((Uint32)(coul)) >> (shift)) & 0xFF)
/*!\brief macro permettant d'extraire une composante rouge de l'Uint32 \a coul */
#define   RED(coul) EXTRACT_COMP(coul, R_SHIFT)
/*!\brief macro permettant d'extraire une composante verte de l'Uint32 \a coul */
#define GREEN(coul) EXTRACT_COMP(coul, G_SHIFT)
/*!\brief macro permettant d'extraire une composante bleue de l'Uint32 \a coul */
#define  BLUE(coul) EXTRACT_COMP(coul, B_SHIFT)
/*!\brief macro permettant d'extraire une composante alpha de l'Uint32 \a coul */
#define ALPHA(coul) EXTRACT_COMP(coul, A_SHIFT)
```

Code source 1.4 – Macros pour la composition d'une couleur et l'extraction de ses composantes.

1.4.3 Faire un dégradé de niveaux de gris et jouer avec les couleurs

Partant des éléments vus précédemment, le CODE SOURCE 1.5 [14] montre comment réaliser un dégradé de niveaux de gris dans un *screen* de 16×16 pixels mappé sur une fenêtre de 320×320 pixels.

```c
#include <GL4D/gl4dp.h>
#include <GL4D/gl4duw_SDL2.h>

static void quitte(void) {
  gl4duClean(GL4DU_ALL);
}

static void dessin(void) {
  int x, y;
  Uint32 c;
  for(y = 0; y < 16; y++)
    for(x = 0; x < 16; x++) {
      c = y * 16 + x;
      c = c | (c << 8) | (c << 16) | (c << 24);
      gl4dpSetColor(c);
      gl4dpPutPixel(x, y);
    }
  gl4dpUpdateScreen(NULL);
}

int main(int argc, char ** argv) {
  if(!gl4duwCreateWindow(argc, argv, "GL4Dummies'␣Hello␣Pixels",
       10, 10, 320, 320, GL4DW_SHOWN) ) {
    return 1;
  }
  gl4dpInitScreenWithDimensions(16, 16);
  atexit(quitte);
  gl4duwDisplayFunc(dessin);
  gl4duwMainLoop();
  return 0;
}
```

Code source 1.5 – Code source du projet `sc_00_01_gradient-1.0` : dégradé de niveaux de gris sur un *screen* de résolution inférieure à celle de la fenêtre.

Même si cela est difficilement distinguable à l'œil (zoomez sur la fenêtre illustrée en Figure 1.6 pour le voir), nous pouvons constater que l'intensité du dégradé dépend de la coordonnée x et y du pixel dans le *screen*.

La ligne : `c = y * 16 + x;` calcule cette intensité de manière à avoir une valeur commençant à zéro, en bas à gauche, et augmentant de 1 de gauche à droite et de 16 d'une ligne à l'autre de bas en haut, arrivant au final à 255 qui représente l'intensité maximale sur une composante codée sur un octet.

14. L'ensemble de cet exemple est téléchargeable à partir de l'adresse : `https://code.up8.edu/amsi/capg/-/tree/main/01_GL4D_beginners/sc_00_01_gradient-1.0`

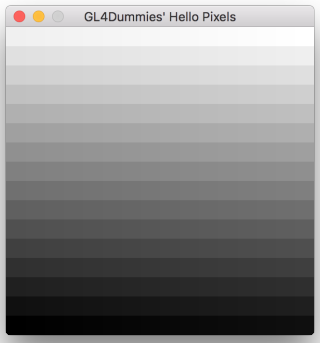


FIGURE 1.6 – Résultat de l'exécution de l'exemple sc_00_01_gradient-1.0 effectuant un dégradé de niveaux de gris sur un *screen* de résolution inférieure à celle de la fenêtre.

Ainsi, sur une architecture *little-endian* (et aussi pour vérifier que dans ce cas le rouge est à droite, le vert est au milieu-droit, le bleu est au milieu-gauche et l'alpha est à gauche), en remplaçant la ligne d'après :

```
c = c | (c << 8) | (c << 16) | (c << 24);
```

par, respectivement :

1. `c = (255 << 24) | c;`
2. `c = (255 << 24) | (c << 8);`
3. `c = (255 << 24) | (c << 16);`
4. `c = (255 << 24) | ((rand()&255) << 16) | ((rand()&255) << 8) | (rand()&255);`

nous obtenons les résultats, illustrés de gauche à droite, de la Figure 1.7. Vous remarquerez que le dernier cas produit une palette différente de couleurs à chaque frame, ceci est dû à la "continuité" de génération de nombres pseudo-aléatoires à chaque fois que la fonction `dessin` est appelée.

Pour finir, nous proposons de modifier légèrement la fonction `dessin` afin d'introduire une intensité initiale qui modifie l'ensemble des pixels. Nous l'introduisons sous la forme d'une variable locale *statique* – le *qualifier* `static` est ajouté avant le type de la variable – ce qui a pour conséquence que cette variable garde sa précédente valeur d'un appel à l'autre de la fonction [15].

15. En quelque sorte, une variable locale statique réside en mémoire dans la même zone que la fonction qui la contient, son adresse ne change pas d'un appel à l'autre ce qui

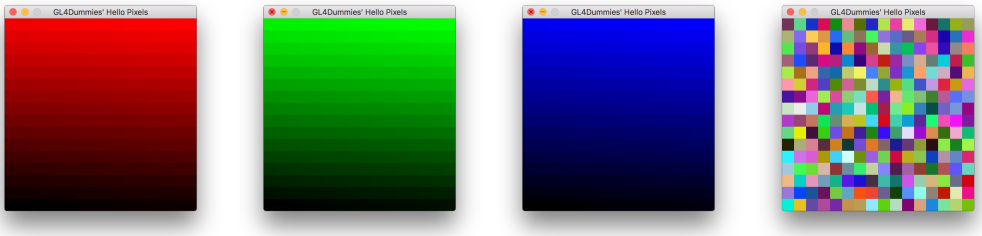


FIGURE 1.7 – Résultats de l'exécution de l'exemple `sc_00_01_gradient-1.0` après modification de la ligne composant la couleur utilisée par le *putPixel*.

Comme nous augmentons la valeur de cette variable à la fin de la fonction, l'intensité initiale augmente d'autant. Afin d'éviter de déborder de la valeur maximale par composante (*i.e.* 255) nous bornons `c` à l'aide d'un `& 0xFF` ce qui équivaut à un modulo 256. Voici le code modifié :

```
static void dessin(void) {
  int x, y;
  Uint32 c;
  static Uint32 intensite_initiale = 0;
  for(y = 0; y < 16; y++)
    for(x = 0; x < 16; x++) {
      /* pour chacun des 256 pixels, calculer l'intensité */
      c = (intensite_initiale + y * 16 + x) & 0xFF; /* pareil que & 255 */
      /* appliquer cette intensité sur chacune des composantes rouge,
       * vert, bleu et alpha du pixel */
      c = (255 << 24) | (c << 16) | (c << 8) | c;
      /* met cette couleur comme couleur de dessin courante */
      gl4dpSetColor(c);
      /* affecte le pixel x,y avec la couleur en cours */
      gl4dpPutPixel(x, y);
    }
  gl4dpUpdateScreen(NULL);
  ++intensite_initiale;
}
```

Nous laissons le lecteur effectuer la modification et constater le résultat obtenu.

1.5 Allons un peu plus loin

Nous abordons ici quelques aspects algortihmiques pour lesquels nous exploitons les premières connaissances en programmation graphique afin de produire des résultats visuellement intéressants.

lui permet de maintenir sa précédente valeur. Il est toujours préférable d'initialiser ce type de variables. Les variables statiques sont placées et initialisées une seule fois, lors du chargement du code en mémoire.

1.5.1 Trier des barres

Au travers de présentation de quelques algorithmes de tri, nous en profitons pour proposer une visualisation temps-réel de la donnée en cours de traitement. Nous commençons par citer quelques méthodes de tri, proposer pour certaines une implémentation puis donnons un exemple de visualisation de données que nous appliquons de manière à visualiser les principales étapes d'un algorithme de tri.

Il existe plusieurs algorithmes de tri, chacun plus ou moins efficace [16], parfois selon la situation. Ici, il ne s'agira pas d'être exhaustif ni de détailler les algorithmes les plus efficaces. Citons néanmoins quelques uns parmi les plus connus [17], pour chacun, nous mettons une note de bas de page exprimant un point de vue totalement personnel et arbitraire :

— Le tri par sélection [18] ;
— Le tri à bulles [19] ;
— Le tri par insertion [20] ;
— Le tri fusion [21] ;
— Le tri rapide ou le *Quicksort* [22].

Aussi, profitons de ce point pour mettre en avant une initiative originale et fort intéressante de l'Université de Sapientia en Roumanie qui propose depuis 2011 un ensemble de vidéos permettant de comprendre le fonctionnement de certains algorithmes de tri. Un groupe de dance folklorique d'Europe centrale est mis en scène de manière à reproduire séquentiellement des algorithmes de tri ; chacun des dix danceurs et danceuses porte un numéro – voir Figure 1.8 – et ils exécutent en détail les étapes liés à chaque algorithme simulé. La chaîne *AlgoRythmics*, disponible en ligne [23], regroupe ces vidéos d'algorithmes de tri et d'autres.

16. L'efficacité d'un algorithme est inversement proportionnelle à une notion appelée complexité souvent notée $\mathcal{O}(1), \mathcal{O}(\log n), \mathcal{O}(n), \mathcal{O}(n^2), ...$ pour respectivement une complexité constante, logarithmique, linéaire ou quadratique avec n représentant le nombre d'éléments dans la donnée à traiter.
17. Ce choix d'algorithmes cités est purement arbitraire, il tente au mieux d'exprimer une certaine variété en terme d'efficacité et de stratégie. Pour plus de détails, nous conseillons au lecteur de parcourir la page WIKIPÉDIA "Algorithme de tri" :
`https://fr.wikipedia.org/wiki/Algorithme_de_tri`
18. Simple et intuitif.
19. Simpliste, local et pas toujours intuitif.
20. Élégant et minimaliste, peut donner le meilleur comme le pire.
21. Stratège et constant dans son efficacité, gourmand.
22. Stratège et, en général, le plus rapide.
23. La chaîne est disponible à l'adresse :

FIGURE 1.8 – *AlgoRythmics* – Université de Sapientia en Roumanie : Vidéo d'une chorégraphie reprenant le déroulement de l'algorithme de tri à bulle.

Le tri par sélection

Le principe du tri par sélection [24] est simple et peut être résumé à :

— Considérer qu'une partie gauche du tableau est triée là où la partie droite ne l'est pas – au début, la partie gauche est vide et celle de droite représente tout le tableau ;

— Parcourir l'ensemble de la partie droite en cherchant l'indice de la plus petite valeur ;

— Échanger les valeurs de la première case de la partie droite avec la case ayant l'indice de la plus petite valeur ;

— La partie gauche grossit d'un élément là où la partie droite perd un élément (en pratique il suffit de décaler un indice de début de partie droite) ;

— S'arrêter dès que la partie droite ne possède plus qu'un seul élément (donc forcément ce dernier est trié car il est seul).

La Figure 1.9 illustre au travers d'un exemple le fonctionnement d'un tri par sélection.

Ci-après, dans CODE SOURCE 1.6, nous donnons une implémentation du tri par sélection ainsi que l'ensemble des fonctions nécessaires pour que le programme soit complet. La fonction `init` initialise pseudo-aléatoirement le tableau `t` de `n` entiers passé en argument, la fonction `print` permet de

`https://www.youtube.com/channel/UCIqiLefbVHsOAXDAxQJH7Xw`
Et le tri à bulles est directement accessible depuis ce lien :
`https://www.youtube.com/watch?v=lyZQPjUT5B4`

24. Ici et pour l'ensemble des autres tris présentés dans cette section, nous considérons que nous trions les éléments d'un tableau dans un ordre croissant.

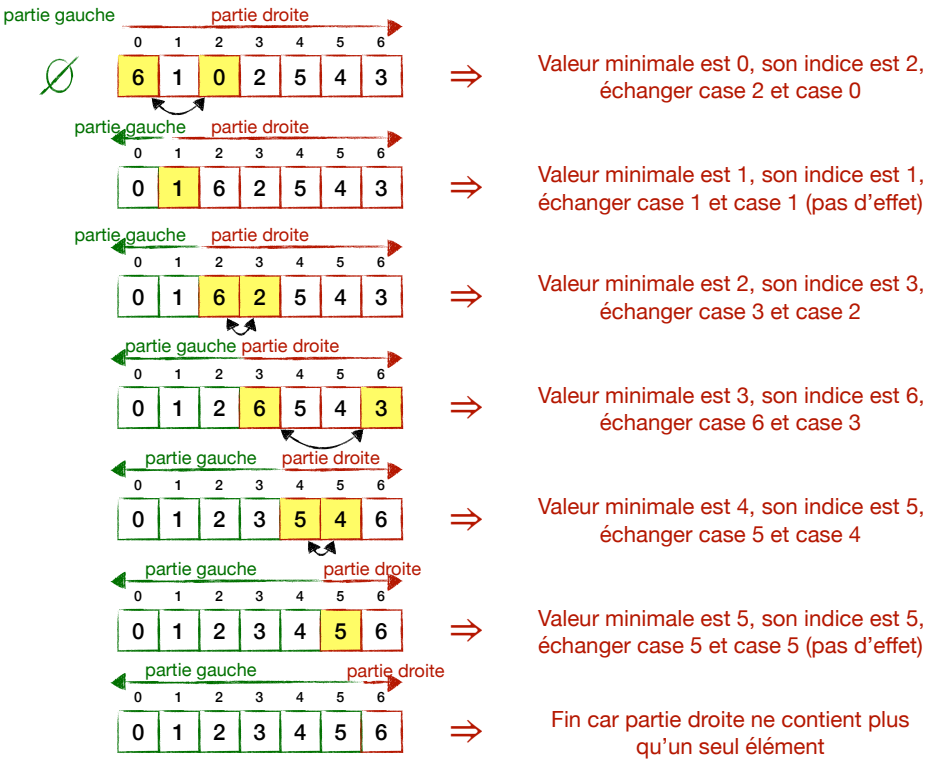


FIGURE 1.9 – Déroulement d'un tri par sélection sur un tableau à 7 éléments.

l'afficher sur le terminal de commandes, la fonction `triSelection` exécute le tri par sélection sur le tableau désordonné et enfin la fonction `main` orchestre le tout.

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
/* Initialise aléatoirement les valeurs du tableau passé en argument
 * avec des valeurs allant de 0 'a n - 1. Utiliser srand (par exemple
 * srand(time(NULL))) pour avoir des valeurs différentes 'a chaque
 * exécution. */
void init(int * t, int n) {
  for(int i = 0; i < n; ++i)
    t[i] = n * (rand() / (RAND_MAX + 1.0));
}
/* Affiche les valeurs du tableau passé en argument. */
void print(int * t, int n) {
  for(int i = 0; i < n; ++i)
    printf("%d ", t[i]);
  printf("\n");
}
/* Tri par sélection du tableau passé en argument. */
void triSelection(int * t, int n) {
  int i, j, min, v;
  for(i = 0; i < n - 1; ++i) {
    min = i;
    for(j = i + 1; j < n; ++j)
      if(t[j] < t[min]) min = j;
    if(i != min) {
      v = t[min];
      t[min] = t[i];
      t[i] = v;
    }
  }
}
int main(void) {
  int t[64];
  init(t, 64);
  print(t, 64);
  triSelection(t, 64);
  print(t, 64);
  return 0;
}
```

Code source 1.6 – Exemple d'implémentation `C` d'un tri par sélection.

Visualiser le tri par sélection

Nous réalisons cet objectif en deux sous-parties. La première consiste à préparer le code pour une visualisation de la donnée, dans le désordre ou triée. La seconde aborde les modifications à apporter à la première pour pouvoir visualiser pas à pas le travail réalisé par l'algorithme de tri. Le lecteur aura le choix entre intégrer les éléments par lui-même ou bien télécharger directement le code source des deux étapes attendues :

`https://code.up8.edu/amsi/capg/-/tree/main/01_GL4D_beginners/sc_00_03_visualSort-1.0`

`https://code.up8.edu/amsi/capg/-/tree/main/01_GL4D_beginners/sc_00_03_visualSort-1.1`

Commençons par récupérer le code vu précédemment et permettant de dessiner un dégradé de gris :

`https://code.up8.edu/amsi/capg/-/tree/main/01_GL4D_beginners/sc_00_01_gradient-1.0`

Nous insérons dans ce code[25] les fonctions `init` et `triSelection` données

25. De préférence en début de fichier juste après les macros (tous les `#include` et autres

dans CODE SOURCE 1.6. Pour dessiner chaque valeur stockée dans le tableau à trier sous la forme d'une barre verticale, nous allons avoir besoin d'une fonction spécifique (car plus optimale) au dessin de segments verticaux. Nous proposons le prototype suivant `static void vLine(int x, int y0, int y1, GLuint color);` où `x` est l'abscisse du segment vertical, `y0` et `y1` l'ordonnée de départ et d'arrivée (sans distinguer forcément laquelle est en haut et laquelle est en bas) et enfin `color` est la couleur en 32-bits à utiliser pour le dessin de cette ligne verticale. Voici donc une proposition d'implémentation à insérer quelque part avant l'usage de cette fonction [26] :

```
static void vLine(int x, int y0, int y1, GLuint color) {
  int w = gl4dpGetWidth(), h = gl4dpGetHeight(), i, p;
  GLuint * pixels = gl4dpGetPixels();
  /* tous les cas à éviter, ne donnant rien */
  if(x < 0 || x >= w || (y0 < 0 && y1 < 0) || (y0 >= h && y1 >= h))
    return;
  y0 = MIN(MAX(y0, 0), h - 1);
  y1 = MIN(MAX(y1, 0), h - 1);
  p = y0 < y1 ? w : -w;
  y0 = y0 * w + x;
  y1 = y1 * w + x;
  for(i = y0; i != y1; i += p)
    pixels[i] = color;
}
```

Vous remarquerez que nous récupérons dans `w` et `h` la largeur et la hauteur du *screen* en cours, que `pixels` est un pointeur vers les pixels de ce *screen*, que les coordonnées sont testées et éventuellement modifiées pour toujours se retrouver à l'intérieur de la grille du *screen* et enfin que `y0` et `y1` sont modifiés afin de devenir les indices (incluant l'abscisse et les sauts `w` en fonction de la ligne) du point de départ et d'arrivée (ou inversement) du segment ; nous allons de l'un à l'autre en utilisant un pas `p` qui vaut `w` ou `-w`.

Étant donnée que dans ce code nous accèderons à plusieurs endroits à la données "tableau trié ou à trier", nous optons pour une déclaration en variable globale mais, attention, avec le *qualifier* qui la rend statique, donc accessible qu'au sein de ce fichier. Nous ajoutons ainsi en haut du fichier (toujours après les macros et autres prototypes) :

```
/* inclusion des entêtes pour rand/srand  */
#include <stdlib.h>
/* inclusion des entêtes pour time (voir son usage dans main) */
#include <time.h>

/* nombre d'élément du tableau à trier */
#define N 128
/* le tableau à trier */
static int _a_trier[N];
```

`#define`) afin de ne pas avoir besoin de prototyper les fonctions pour les utiliser avant leur définition.

26. Ou bien optez pour un prototypage en haut du fichier et une définition où bon vous semble.

Nous ajoutons aussi une fonction `calcul` qui sera appelée comme *callBack* de type *idle* pour jouer le rôle de la phase simulation dans la boucle infinie d'affichage *événement-simulation-dessin*, modifions aussi la fonction `dessin` :

```
/* appelée à chaque idle par gl4duwMainLoop */
static void calcul(void) {
  triSelection(_a_trier, N);
}
/* appelée à chaque draw par gl4duwMainLoop */
static void dessin(void) {
  int i;
  for(i = 0; i < N; ++i)
    vLine(i, 0, _a_trier[i], RGB(128, 128, 128));
  gl4dpUpdateScreen(NULL);
}
```

Finissons par quelques modifications dans la fonction `main` :

```
int main(int argc, char ** argv) {
  /* initialisation de la chaine pseudo-aléatoire en utilisant le temps */
  srand(time(NULL));
  /* remplir aléatoirement le tableau */
  init(_a_trier, N);
  if(!gl4duwCreateWindow(argc, argv, /* args du programme */
                         "GL4Dummies'␣Hello␣Pixels", /* titre */
                         10, 10, 4 * N, 2 * N, /* x,y, largeur, heuteur */
                         GL4DW_SHOWN) /* état visible */) {
    return 1; /* échec si ici */
  }
  /* screen aux dim de la data à trier (nb-élém. et valeurs dedans) */
  gl4dpInitScreenWithDimensions(N, N);
  /* ajoute quitte à la pile des TODO en sortant du programme */
  atexit(quitte);
  /* met en place la display au sein de la boucle event-simu-draw */
  gl4duwDisplayFunc(dessin);
  /* met en place la idle correspondant à la phase "simulation".
   * Commentez cette ligne pour visualiser le tableau non trié. */
  gl4duwIdleFunc(calcul);
  /* boucle infinie pour éviter l'arrêt prématuré du programme */
  gl4duwMainLoop();
  return 0;
}
```

Nous soulignons que la donnée `_a_trier`[27] est initialisée en tout début de programme, précédée d'un `srand` qui permet de modifier l'étape initiale de la chaîne pseudo-aléatoire[28]. Aussi, que la fenêtre et le *screen* sont à des dimensions relatives à `N`, le nombre d'éléments dans `_a_trier` mais aussi un de plus que la valeur maximale qui peut être mise dedans par la fonction `init`. Enfin, remarquez la présence du *set* de la *callBack* de simulation.

Ce code ainsi modifié / complété, donne par exemple les résultats présents sur la Figure 1.10 sachant que l'image de gauche et de droite correspondent

27. Pour la distinguer des autres, j'ai pour habitude personnelle de précéder le nom d'une variable statique et globale par un *underscore* ... et non un tiret du 8 comme disent certains :)

28. Connaissez-vous l'effet papillon ?

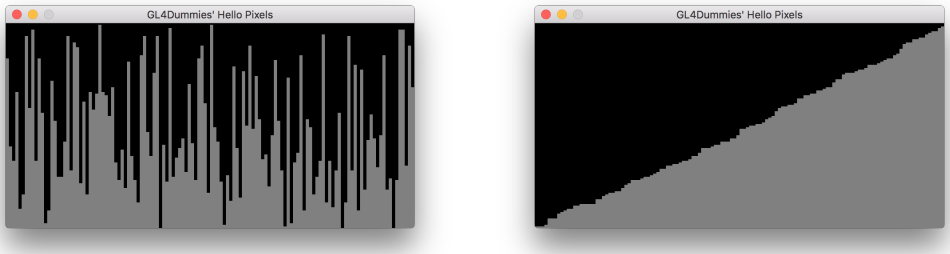


FIGURE 1.10 – Résultats figés de la visualisation de la donnée non triée (à gauche) et triée (à droite).

respectivement au fait d'avoir commenté ou laissé telle quelle la ligne de code `gl4duwIdleFunc(calcul);`.

Notons que dans un cas ou dans l'autre, le résultat est toujours figé, soit le tableau n'est pas trié, soit il l'est mais rien ne change visuellement. Nous apportons donc les modifications au code qui vont nous permettre de visualiser les modifications quand ces dernières se produisent. Ici il ne s'agit pas de piloter le graphique par la simulation [29] mais plutôt de faire en sorte que la simulation, au rythme de la visualisation, apporte le peu de nouveautés étape par étape pour que nous puissions visualiser le travail de l'algorithme de tri en œuvre ici. Ce résultat attendu est visualisable dans la vidéo présente à cette url :

`https://youtu.be/fZm-jPDJnqM`

Ainsi, nous commençons par ajouter deux éléments de type entier qui nous permettent de savoir, à l'issue d'une étape de l'algorithme, quelles sont les deux cases (donc quels sont les indices) du tableau que nous devons échanger. De cette manière, nous pourrons les surligner en rouge comme dans la vidéo juste avant de les échanger. Nous optons pour un tableau statique et global à deux éléments pour stocker les deux indices qui nous intéressent :

```
/* les indices des deux données qui échangeront leurs places */
 * ligne à placer par exemple après la déclaration de _a_trier */
static int _to_swap[2] = {-1, -1};
```

Notons que la valeur -1 correspond à un indice que nous considérons non

29. Ceci est possible, voire même plus facile pour une personne maîtrisant les appels bas niveau de la bibliothèque de gestion du fenêtrage (forcer la mise à jour de la fenêtre quand l'algorithme de tri le souhaite), mais cela va à l'encontre du paradigme *event-simu-draw*.

valide. Ainsi, quand nous rencontrerons -1 nous ne surlignerons aucune entrée.

La partie qui subit le plus de changements est l'algorithme lui-même, donc la fonction `triSelection`. Nous souhaitons qu'à chaque fin de phase de simulation nous soyons prêt (tant que cela n'est pas fini) à échanger deux nouveaux éléments dans le tableau car nous aurons "sélectionné" le plus petit du sous-tableau de droite et il sera prêt à être échanger avec le premier élément de ce sous-tableau, c'est-à-dire le `i` de la boucle `for` de la version initiale. Donc à chaque appel, il s'agit d'un seul `i` et d'un seul `min` ; `i` est alors transformé en variable statique commençant à zéro et qui ne s'incrémente qu'au maximum une fois à la fin pour préparer l'étape suivante, c'est-à-dire trouver le meilleur pour la place `i=1` ... Le `for` sur le `i` disparaît donc au détriment d'un simple test `i < n - 1`. Par ailleur, au lieu de faire l'échange dès que nous avons les bons candidats `i` et `min`, nous nous contentons de les stocker dans `_to_swap` pour le faire à l'étape d'après, se laissant ainsi le temps de surligner les deux valeurs à échanger avant de le faire réellement. Ainsi, nous savons qu'il faudra – dès le début d'une nouvelle étape, et si nous avons des valeurs différentes dans les deux cases de `_to_swap` – faire un échange pour rendre effectif l'étape précédente. Tout ceci nous amène à la proposition suivante :

```
static void triSelection(int * t, int n) {
  /* i devient statique car la boucle disparaît à ce niveau */
  static int i = 0;
  int j, min;
  /* échanger après coup les deux valeurs de l'étape  précédente */
  if(_to_swap[0] != _to_swap[1]) {
    int v = t[_to_swap[1]];
    t[_to_swap[1]] = t[_to_swap[0]];
    t[_to_swap[0]] = v;
  }
  /* dire qu'aucune donnée n'est à échanger */
  _to_swap[0] = _to_swap[1] = -1;
  /* plus de boucle, on attend le prochain tour idle */
  if(i < n - 1) {
    min = i;
    for(j = i + 1; j < n; ++j)
      if(t[j] < t[min])
        min = j;
    /* marquer les deux données à échanger au prochain appel */
    _to_swap[0] = i; _to_swap[1] = min;
    /* i se prépare pour la prochaine fois en augmentant de 1 */
    ++i;
    /* ajouter un délai en ms (ralentir 1/4 de seconde) pour
     * avoir le temps de visualiser l'étape */
    SDL_Delay(250);
  }
}
```

Pour compléter, la ligne optionnelle contenant `SDL_Delay(250);` n'est là que pour ralentir le rendu et laisser le temps à l'utilisateur de voir ce qui se passe.

Ce ralentissement peut-être placé ailleurs, par exemple dans `dessin`.

Les derniers ajouts concernent la fonction `dessin` qui aura deux tâches supplémentaires à effectuer. La première (on va faire simple), effacer l'ensemble du *screen* afin que les dessins ne viennent pas s'ajouter en surimpression. La seconde, surligner en rouge les deux valeurs aux positions échangeables stockées dans `_to_swap`. Ce qui donne :

```
static void dessin(void) {
  int i;
  /* effacer l'écran à chaque fois car la donnée peut etre
   * différente d'une frame à l'autre */
  gl4dpClearScreen();
  for(i = 0; i < N; ++i)
    vLine(i, 0, _a_trier[i], RGB(128, 128, 128));
  /* surligner en rouge les deux positions à échanger */
  if(_to_swap[0] >= 0) {
    vLine(_to_swap[0], 0, _a_trier[_to_swap[0]], RGB(255, 0, 0));
    vLine(_to_swap[1], 0, _a_trier[_to_swap[1]], RGB(255, 0, 0));
  }
  gl4dpUpdateScreen(NULL);
}
```

Le tri à bulles ou d'autres

Le tri à bulles fonctionne sur le principe suivant : parcourir du début à la fin (soit de gauche à droite) le tableau en regardant la case courante et celle qui est juste à sa droite, si la courant est plus grande que celle de droite alors les échanger et continuer jusqu'au bout (en pratique le bout - 1 car on regarde toujours un coup à l'avance à droite). Conclusion à la fin de ce parcours, on imagine que la valeur la plus grande du tableau serait remontée de proche en proche de la gauche (le bas) vers la droite (le haut), comme une bulle qui remonte dans un liquide. Il est sûr que la plus grande valeur se retrouve complètement à droite, mais au passage, nous savons que quelques valeurs qui sont grandes, mais pas les plus grandes, ont aussir réussi à remonter légèrement. Il suffit ainsi de considérer que nous avons trouvé et classé (au bout à droite) la plus grande valeur du tableau et qu'il reste à faire de même pour la deuxième plus grande sur le sous-tableau allant un cran moins loin. Puis ainsi de suite, pour la troisième plus grande, la quatrième ... Ceci ressemble assez à l'algorithme de tri par sélection mais il faut noter qu'ici des échanges peuvent intervenir plusieurs fois à chaque grande étape (trouver le plus grand du sous tableau de gauche) alors que dans un tri par sélection nous n'échangeons qu'une seule fois. C'est ce qui fait de l'algorithme de tri à bulles l'un des moins efficaces.

Nous proposons une implémentation de ce tri, sur le même modèle que le tri par sélection :

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
void init(int * t, int n) {
  for(int i = 0; i < n; ++i)
    t[i] = n * (rand() / (RAND_MAX + 1.0));
}
void print(int * t, int n) {
  for(int i = 0; i < n; ++i)
    printf("%d␣", t[i]);
  printf("\n");
}
void triBulles(int * t, int n) {
  int i, j;
  for(i = n - 1; i >= 0; --i)
    for(j = 1; j <= i; ++j)
      if(t[j - 1] > t[j]) {
        /* vous vous souvenez ? échange de 2 variables
         * sans utiliser une troisième */
        t[j]     ^= t[j - 1];
        t[j - 1] ^= t[j];
        t[j]     ^= t[j - 1];
      }
}
int main(void) {
  int t[64];
  init(t, 64);
  print(t, 64);
  triBulles(t, 64);
  print(t, 64);
  return 0;
}
```

Code source 1.7 – Exemple d'implémentation `C` d'un tri à bulles.

Enfin, sans aller jusqu'à expliquer le fonctionnement d'autres tris, nous proposons au lecteur une implémentation d'un tri par insertion et d'un tri par fusion, chacune respectivement donnée dans les CODE SOURCE 1.8 et 1.9.

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
void init(int * t, int n) {
  for(int i = 0; i < n; ++i)
    t[i] = n * (rand() / (RAND_MAX + 1.0));
}
void print(int * t, int n) {
  for(int i = 0; i < n; ++i)
    printf("%d␣", t[i]);
  printf("\n");
}
void triInsertion(int * t, int n) {
  int i, j, v;
  for(i = 1; i < n; i++) {
    v = t[(j = i)];
    while(j > 0 && t[j - 1] > v) {
      t[j] = t[j - 1];
      j--;
    }
    t[j] = v;
  }
}
int main(void) {
  int t[64];
  init(t, 64);
  print(t, 64);
  triInsertion(t, 64);
  print(t, 64);
  return 0;
}
```

Code source 1.8 – Exemple d'implémentation `C` d'un tri par insertion.

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
void init(int * t, int n) {
  for(int i = 0; i < n; ++i)
    t[i] = n * (rand() / (RAND_MAX + 1.0));
}
void print(int * t, int n) {
  for(int i = 0; i < n; ++i)
    printf("%d ", t[i]);
  printf("\n");
}
int s[64]; /* pas beau ..., l'allocation dynamique
      * c'est pour plus tard */
void triFusion(int * t, int g, int d) {
  int i, j, k, m;
  if(d > g) {
    m = (d + g) >> 1;
    triFusion(t, g, m);
    triFusion(t, m + 1, d);
    for(i = m; i >= g; i--)
      s[i] = t[i];
    for(j = m; j < d; j++)
      s[d + m - j] = t[j + 1];
    for(k = g, i = g, j = d; k <= d; k++)
      t[k] = (s[i] < s[j]) ? s[i++] : s[j--];
  }
}
int main(void) {
  int t[64];
  init(t, 64);
  print(t, 64);
  triFusion(t, 0, 63);
  print(t, 64);
  return 0;
}
```

Code source 1.9 – Exemple d'implémentation C d'un tri par fusion.

Exercice (à rendre sur moodle, déposez une ou deux archives)

1. Sur le modèle de ce qui a été fait pour visualiser le fonctionnement du tri par sélection, faire de même pour le tri à bulles ;
2. Sur le modèle de ce qui a été fait pour visualiser le fonctionnement du tri par sélection, faire de même pour au choix : le tri par insertion, le tri par fusion, ou bien un autre tri qui vous intéresse ;

Bibliographie

[GL420] GL4D. Introduction à gl4dummies et documentation de référence. https://gl4d.api8.fr, 2020.