Université Clermont Auvergne

École Universitaire de Physique et d'Ingénierie

Diplôme : Master Imagerie et Technologie pour la Médecine (TechMed)

Travail Encadré de Recherche

Présenté par : LEHARA Lyes

Thème : Bibliothèque de traitement d'images en C++

Dirigé par : Mme. PERY Emile

Année universitaire : 2024/2025

Table de matière

Liste des figures

1. Introduction

Le traitement d'images, qui est un sous-domaine du traitement du signal, englobe l'ensemble des méthodes et techniques appliquées aux images et vidéos dans le but d'extraire des informations pertinentes ou d'améliorer leur perception visuelle. Avant toute phase de traitement, un prétraitement est souvent requis pour optimiser la qualité des images. Cela comprend, par exemple, des opérations de rehaussement de contraste, de suppression de bruit, de correction du flou, ainsi que des techniques de segmentation ou d'extraction de contours visant à isoler les éléments significatifs d'une image.

Ce rapport fournit une synthèse des différentes versions évolutives de notre bibliothèque de traitement d'images en C++. La version de base de notre projet repose sur une architecture fonctionnelle utilisant des templates, tandis que les versions ultérieures introduisent une approche orientée objet, en intégrant deux classes, Image et ImageRGB, ainsi que des surcharges d'opérateurs.

La dernière étape de notre projet consiste à mettre en œuvre des méthodes de prétraitement (rehaussement de contraste, suppression de bruit, correction du flou), ainsi que des techniques de segmentation et d'extraction de contours, sur diverses images.

2. Définition d'une image

Une image, c'est une représentation visuelle d'une personne ou d'un objet, réalisée par des moyens comme la peinture, le dessin, la photo ou la vidéo. Elle peut également être définie comme un ensemble structuré d'informations qui, une fois affichées à l'écran, permettent à l'œil humain de les reconnaître [1].

2.1 Codage d'une image (image numérique)

Une image numérique est une représentation visuelle d'un objet ou d'une scène, composée d'une grille de petits éléments appelés pixels. Chaque pixel contient une information, comme une couleur ou un niveau de gris, qui permet de reconstituer l'image dans son ensemble.

Cette image peut provenir d'une photo, d'un dessin ou d'une vidéo, et devient numérique grâce à un processus appelé numérisation[1], qui convertit une image réelle (analogique) en une matrice de valeurs numériques.

Mathématiquement, une image numérique est représentée par une fonction à deux dimensions, ***f(x, y)***, où chaque point ***(x, y)*** correspond à un pixel, et ***f(x, y)*** indique l'intensité lumineuse à ce point. Cela signifie que chaque pixel est une mesure de la lumière captée à un endroit précis de l'image.

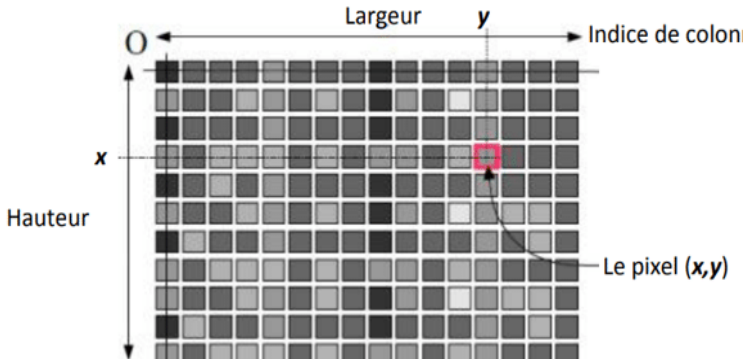


Figure 1: Représentation d'image numérique.

3. Présentation de Projet

La bibliothèque développée pour ce projet a été conçue sur structure organisée, facile à adapter et facile à comprendre, pour simplifier la création d'applications de traitement d'images en C++.

Chaque version de la bibliothèque est encapsulée dans un bloc **namespace** versionnés **(v1.0**, **v1.1** et **v2.0)** afin de bien séparer les différentes versions, éviter les problèmes de noms identiques et permettre d'ajouter de nouvelles fonctionnalités au fil du temps.

La bibliothèque est divisée en modules bien définis, chacun s'occupant d'un type précis de traitement (comme la conversion, le filtrage ou la génération d'images).

L'utilisation des **templates** permet de créer **des fonctions** et des **classes génériques**, pour manipuler les différents types de données d'images

Enfin, elle repose sur une organisation en **classes de base** et **classes filles**, qui permet de mieux structurer le code, de le rendre plus clair, plus facile à maintenir et à faire évolue.

[1] La **numérisation** : est le processus qui consiste à convertir une information analogique en données numériques exploitables par un ordinateur.

4. Namespace version 1.0

4.1 Introduction :

La version 1.0 utilise des fonctions de base pour travailler avec des images. Elle permet de créer différentes images comme des images blanches, des damiers ou encore des images sinusoïdales. Elle peut aussi lire et enregistrer des fichiers d'image au format brut (. Raw). En plus, elle peut transformer des images de 16 bits ou plus, en images plus simples de 8 bits. Elle permet aussi d'appliquer des filtres de couleur LUT. Toutes ces opérations sont faites en utilisant des tableaux dynamiques **std::vector** en C++.

4.2 Implémentation des fonctions

4.2.1 Allocation d'images

Cette fonction sert à allouer dynamiquement une image sous forme d'un vecteur à une seule dimension dont la taille correspond à la largeur multipliée par la hauteur de l'image. C'est une fonction de type générique (template), elle peut fonctionner avec n'importe quel type de données (int, float, uint16_t, etc.).

```
17  namespace v1_0 {
18  
19      template <typename T>
20      std::vector<T> allocationImage(size_t largeur, size_t hauteur) {
21          return std::vector<T>(largeur * hauteur);
22      }
```

Figure 2: Fonction d'allocation d'image.

4.2.2 Création d'images particulières

4.2.2.1 Image Blanche

La fonction **ImageBlanche** permet de créer une image blanche de taille **hauteur** multiplié par la **longueur.** Chaque pixel est initialisé avec la valeur maximale possible du type générique *T* (**grâce à std::numeric_limits<T>::max()**), ce qui correspond à la couleur blanche en niveaux de gris.

Exemple :

- Si T = **uint8_t** [2], alors max = 255 correspond à la couleur blanche
- Si T = **uint16_t**[3], alors max = 65535 correspond à la couleur blanche

```
23
24      // Image blanche
25      template <typename T>
26      std::vector<T> ImageBlanche(size_t largeur, size_t hauteur) {
27          return std::vector<T>(largeur * hauteur, std::numeric_limits<T>::max());
28  }
29
```

Figure 3: Création d'image blanche.

4.2.2.2 Image Damier

Cette fonction générique ***ImageDamier*** crée une image en damier de dimensions données (**haueur** multiplié par **largeur** de l'image). Elle utilise deux boucles pour parcourir chaque pixel, et détermine si le pixel appartient à une case blanche ou noire en divisant les indices x et *y* par la taille de la case (**tailleCase**) modulo 2, puis en comparant leurs parités. Si la case est blanche, le pixel prend la valeur maximale 255 (blanc) ; sinon, il prend 0 (noir). L'image ainsi remplie est ensuite retournée.

```
45
46      // Damier
47      template <typename T>
48      std::vector<T> ImageDamier(size_t largeur, size_t hauteur, size_t tailleCase) {
49          std::vector<T> image(largeur * hauteur);
50
51          for (size_t y = 0; y < hauteur; ++y) {
52              for (size_t x = 0; x < largeur; ++x) {
53                  bool estBlanc = ((x / tailleCase) % 2 == (y / tailleCase) % 2);
54                  image[y * largeur + x] = estBlanc ? std::numeric_limits<T>::max() : 0;
55              }
56          }
57          return image;
58      }
59
```

Figure 4: Création d'image damier.

4.2.2.3 Image Sinusoïdale

La fonction ***SinusoïdaleImage*** génère une image dont l'intensité des pixels varie selon une onde sinusoïdale. Elle prend en paramètre la largeur, la hauteur et la fréquence de l'onde qui représente le nombre de période de la fonction sinus.

- Pour chaque pixel, elle calcule une valeur sinus entre -1 et 1, puis la normalise entre 0 et 1 car les images utilisent des valeur positive (0 à 255) :

[2] **Uint8_t** est un type de donnée entier non signé utilisé pour les images 8 bits.
[3] **Uint16_t** est un type de donnée entier non signé utilisé pour les **images haute précision.**

double valeur = std::sin(2 * M_PI * frequence * x / largeur);

double valnormaliser = (val + 1.0) * 0.5;

Puis la convertit en une intensité adaptée au type *T* (par exemple entre 0 et 255). L'image ainsi remplie est ensuite retournée.

```
29
30      // Mire sinusoïdale
31      template <typename T>
32      std::vector<T> SinusoidalImage(size_t largeur, size_t hauteur, double frequence) {
33          std::vector<T> image(largeur * hauteur); //Allocation de l'image
34
35
36          for (size_t y = 0; y < hauteur; ++y) {
37              for (size_t x = 0; x < largeur; ++x) {
38                  double valeur = std::sin(X: 2 * M_PI * frequence * x / largeur);
39                  double Valnormaliser = (valeur + 1.0) * 0.5;
40                  image[y * largeur + x] = static_cast<T>(Valnormaliser * std::numeric_limits<T>::max());
41                  }
42          }
43          return image;
44      }
45
```

Figure 5: Création d'image sinusoïdale.

❖ **Les Resultats obtenus**

Les figures ci-dessus montrent le résultat obtenu après l'appel aux fonctions.

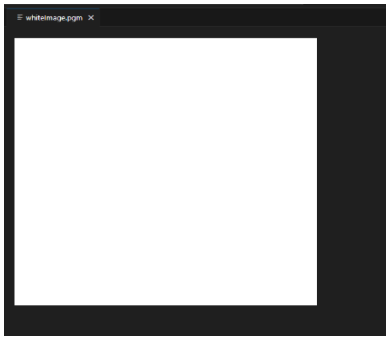


Figure 8: Aperçu d'une image Blanche

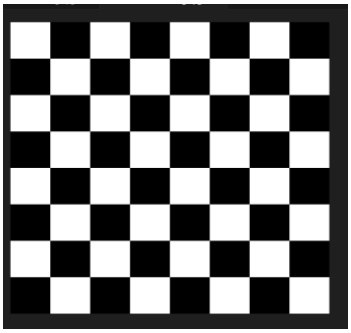


Figure 7: Aperçu d'une image dan

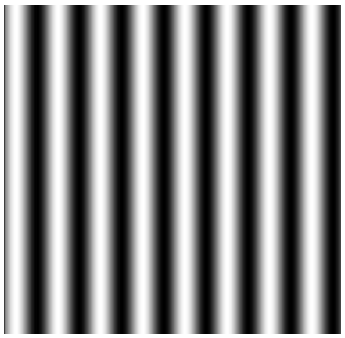


Figure 6: Aperçu d'une image sinusoïdal

4.2.3 Lecture et écriture des fichiers images au format brut (.RAW) :

4.2.3.1 Fichier Raw :

Un **fichier RAW** [4](du mot anglais ***.raw*** signifiant ***brut***) est un type de fichier généré par un appareil photo numérique ou un scanner, qui contient les données **brutes** captées par le capteur, sans aucun traitement.

[4] Un **fichier brut (RAW)** est un fichier qui contient uniquement les données sans aucune métadonnée (pas d'en-tête**,** pas de dimensions, pas d'information sur les canaux couleur).

4.2.3.2 Lecteur de fichiers images au format brut

La fonction ***lireImageRaw()*** lit une image au format RAW et retourne ses pixels dans un vecteur. Elle prend en paramètre le nom du fichier **nomfichier**, les dimensions de l'image (la **haueur** et la **longueur**) et **bigEndian**[5] comme Boolean.

Big et **little endian** sont deux manières différentes de stocker les **octets** d'une valeur multi-octets (par exemple un entier sur 2 ou 4 octets) dans un fichier ou une mémoire.

- **Big-endian** → On stocke l'**octet le plus significatif** en premier (en tête).
- **Little-endian** → On stocke l'**octet le moins significatif** en premier.

Exemple : si on veut stocker la valeur **0x1234** (sur 2 octets) :

- En **big-endian** : 12 34
- En **little-endian** : 34 12

Ensuite, Elle lit les données pixel par pixel, en convertissant correctement les octets selon l'ordre spécifié, puis sauvegarde les valeurs dans un vecteur. Si le fichier ne s'ouvre pas, elle renvoie une image vide.

```
110
111     template<typename T>
112     std::vector<T> lireImageRAW(const std::string& nomFichier, int largeur, int hauteur, bool bigEndian = false) {
113     std::ifstream in(Str: nomFichier, Mode: std::ios::binary);
114     if (!in) throw std::runtime_error(Message: "Erreur d'ouverture du fichier : " + nomFichier);
115
116     std::vector<T> img(largeur * hauteur);
117     in.read(Str: reinterpret_cast<char*>(img.data()), Count: img.size() * sizeof(T));
118
119     if (bigEndian && sizeof(T) > 1) {
120         for (T& pixel : img) {
121             uint8_t* ptr = reinterpret_cast<uint8_t*>(&pixel);
122             std::reverse(First: ptr, Last: ptr + sizeof(T));
123         }
124     }
125
126     in.close();
127     return img;
128 }
129
```

Figure 9: Lecteur d'un fichier brut

4.2.4 Ecriture de fichiers images au format brut

La fonction ***ecrireFichierRaw()*** permet d'enregistrer une image (stockée dans un vecteur) dans un fichier brut (.Raw). Elle prend en paramètre l'image et le nom du fichier de destination

[5] **Endianness** désigne l'ordre dans lequel les octets sont stocké en mémoire

```cpp
template<typename T>
void ecrireFichierRaw(const std::vector<T>& image, const std::string& filename) {
    std::ofstream out(Str: filename, Mode: std::ios::binary);
    out.write(Str: reinterpret_cast<const char*>(image.data()), Count: image.size() * sizeof(T));
    out.close();
}
```

Figure 10: Ecriture d'un fichier brut

4.2.5 Conversion d'image

4.2.5.1 Conversion d'image d'un type à un autre

La fonction ***convertImage()*** permet de convertir une image représentée sous forme de vecteur (std::vector) de pixels d'un type source (SrcType : type des pixels d'entrée comme **uint8_t, float,** etc.) vers un type destination (DstType : type des pixels de sortie **uint8_t, float,** etc.), avec une option pour ajuster dynamiquement [6]la plage des valeurs (dynamique).

```cpp
// Conversion de l'image
template<typename SrcType, typename DstType>
std::vector<DstType> convertImage(const std::vector<SrcType>& image, bool adjustDynamics) {
    std::vector<DstType> imageCnvert(image.size());

    SrcType minVal = *std::min_element(image.begin(), image.end());
    SrcType maxVal = *std::max_element(image.begin(), image.end());

    for (size_t i = 0; i < image.size(); ++i) {
        if (adjustDynamics) {
            imageCnvert[i] = static_cast<DstType>(
                ((image[i] - minVal) / static_cast<double>(maxVal - minVal)) * std::numeric_limits<DstType>::max()
            );
        } else {
            imageCnvert[i] = static_cast<DstType>(image[i]);
        }
    }

    return imageCnvert;
}
```

Figure 11: Conversion d'une image d'un type à un autre.

4.2.5.2 Conversion d'image de RGB vers niveau de gris

La fonction ***convertRGB_Gris()*** transforme une image couleur **RGB** (stockée dans un **std::vector[7]<uint8_t>)** en une image en **niveaux de gris**. Elle parcourt chaque pixel de l'image puis, elle extrait les composantes rouge, verte et bleue, puis calcule une seule valeur de gris en appliquant une formule pondérée (0.299 pour le rouge, 0.587 pour le vert et 0.114 pour le bleu). Enfin elle retourne le résultat comme une image en noir et blanc.

---

[6] **L'ajustement dynamique** consiste à répartir les valeurs de pixel de l'image source (par exemple en 16 bits) sur toute la plage disponible du type de destination (par exemple 8 bits)**.**

[7] **Vector** est un tableau (array) redimensionnable automatiquement **(**Il n'est pas nécessaire de définir sa taille au moment de la déclaration.)

```cpp
std::vector<uint8_t> convertRGB_Gris(const std::vector<uint8_t>& rgbImage, size_t largeur, size_t hauteur) {
    std::vector<uint8_t> imageGris(Count: largeur * hauteur);
    for (size_t i = 0; i < largeur * hauteur; ++i) {
        uint8_t r = rgbImage[i * 3 + 0];
        uint8_t g = rgbImage[i * 3 + 1];
        uint8_t b = rgbImage[i * 3 + 2];
        imageGris[i] = static_cast<uint8_t>(0.299 * r + 0.587 * g + 0.114 * b);
    }
    return imageGris;
}
```

Figure 12: Conversion d'une image RGB en niveau de gris

4.2.6 Conversion d'une image en fausses couleurs à l'aide d'une LUT

4.2.6.1 Fichier LUT

Une **LUT** (*Look-Up Table*, ou table de correspondance en français), est un tableau de valeurs numériques utilisé en traitement d'image, vidéo ou graphisme. Elle permet de modifier facilement les couleurs ou la luminosité de l'image.**[4]**

4.2.6.2 Chargement de fichier LUT (le filtre LUT)

La fonction **chargerLUT** permet de lire un fichier binaire contenant une table correspondance (Look-Up Table) et retourne un vecteur de uint8_t en sortie

```cpp
        You, seconds ago • Uncommitted changes
    std::vector<uint8_t> chargerLUT(const std::string& fichier) {
    std::vector<uint8_t> lut(Count: 256 * 3);
    std::ifstream file(Str: fichier, Mode: std::ios::binary);
    if (!file) {
        std::cerr << "Erreur de lecture du fichier LUT\n";
        return lut;
    }
    file.read(Str: reinterpret_cast<char*>(lut.data()), Count: lut.size());
    return lut;
}
```

Figure 13: Chargement de fichier LUT.

4.2.6.3 Application de fausse couleur à l'aide de LUT

La fonction ***applyLUT*** transforme une image de niveaux de gris en image couleur en remplaçant chaque pixel gris par une couleur définie dans une table LUT, selon son intensité.

Les figures ci-dessous montrent le code de la fonction **applyLUT** ainsi que le schéma fonctionnel illustrant le calcul des valeurs **RGB** à partir d'un pixel en niveaux de gris à l'aide de la table LUT.

```cpp
std::vector<uint8_t> applLUT(const std::vector<uint8_t>& imageGris, const std::vector<uint8_t>& lut) {
    if (lut.size() % 3 != 0) {
        throw std::runtime_error(Message: "LUT doit contenir un multiple de 3 valeurs RGB.");
    }

    size_t numColors = lut.size() / 3;
    std::vector<uint8_t> imageRGB(Count: imageGris.size() * 3);

    for (size_t i = 0; i < imageGris.size(); ++i) {
        uint8_t intensity = imageGris[i];

        if (intensity >= numColors) {
            throw std::runtime_error(Message: "le niveau de gris dépasse la plage de valeurs supportée par la LUT");
        }

        size_t lutIndex = intensity * 3;

        imageRGB[3 * i + 0] = lut[lutIndex + 0]; // R
        imageRGB[3 * i + 1] = lut[lutIndex + 1]; // G
        imageRGB[3 * i + 2] = lut[lutIndex + 2]; // B
    }

    return imageRGB;
}
```

Figure 14 : Application de LUT sur l'image

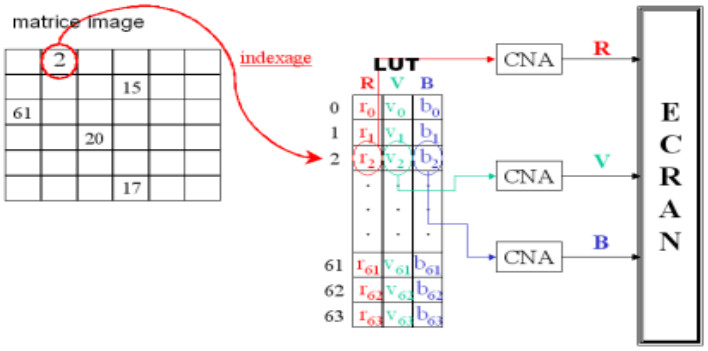


***Figure 15: Conversion d'un pixel gris en RGB via une LUT* [9]**

4.2.6.4 Sauvegarde des images en. PGM et. PPM

- **Format .pgm** (Portable Graymap): est un format d'image en niveaux de gris, où chaque pixel est représenté par une valeur indiquant son intensité lumineuse entre 0 et 255. Le fichier commence par un en-tête texte "P5" (format binaire) suivi des dimensions de l'image et de la valeur maximale des niveaux de gris. Les données des pixels sont ensuite enregistrées directement, ligne par ligne, dans le fichier.
- **Format .PPM (Portable Pixmap):** Ce format est utilisé pour visualiser des images en couleur **(RGB).** Le fichier commence par un en-tête texte "P6" (format binaire), suivi des dimensions et de la valeur maximale (255), puis tous les pixels RGB sont enregistrés à la suite en binaire.

Les figures suivantes présentent le code de sauvegarde d'une image aux formats **PGM** et **PPM**.

```
337
338     template<typename T>
339     void Image<T>::sauvegarderPGM( const std::string& fichier) const {
340         std::ofstream ofs(Str: fichier, Mode: std::ios::binary);
341         ofs << "P5\n" << _largeur << " " << _hauteur << "\n255\n";
342         ofs.write(Str: reinterpret_cast<const char*>(_image.data()), Count: _image.size());
343     }
344
```

Figure 16:Extrait de code pour la fonction sauvegarde .pgm

```
441 void ImageRGB::sauvegarderPPM(const std::string& fichier) const {
442     std::ofstream file(Str: fichier, Mode: std::ios::binary);
443     if (!file) {
444         std::cerr << "Erreur : impossible de créer le fichier " << fichier << std::endl;
445         return;
446     }
447
448     file << "P6\n" << getlargeur() << " " << gethauteur()<< "\n255\n";
449     file.write(Str: reinterpret_cast<const char*>(_ImageRGB.data()), Count: getlargeur() * gethauteur() * 3);
450     file.close();
451 }
452
```

Figure 17 : Extrait de code pour la fonction sauvegarde .ppm

5. Tester des filtres LUT sur les différentes images

Les figures suivantes montrent le résultat obtenu après l'appel aux fonctions précédentes

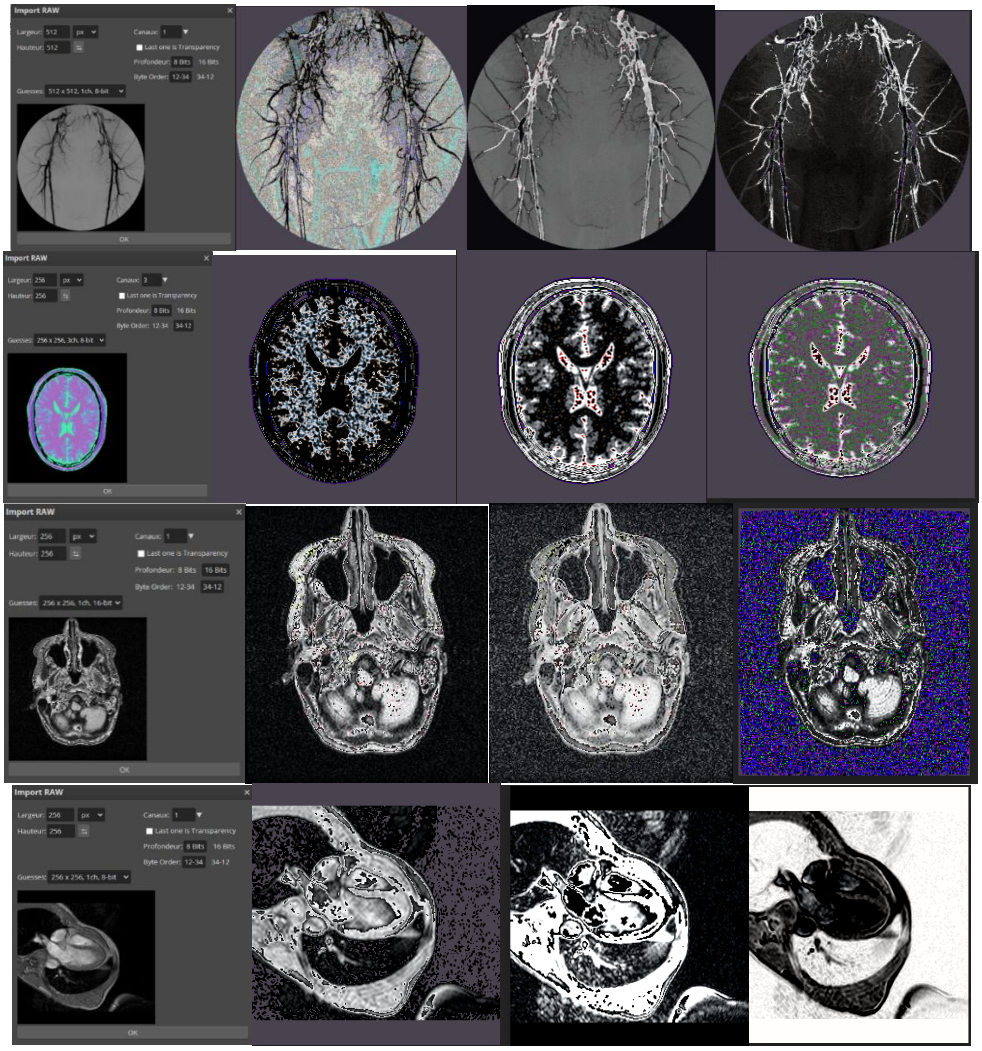


Figure 18: Résultat de l'application de LUT sur les différentes images

6. Namespace version 1.1

6.1 Introduction

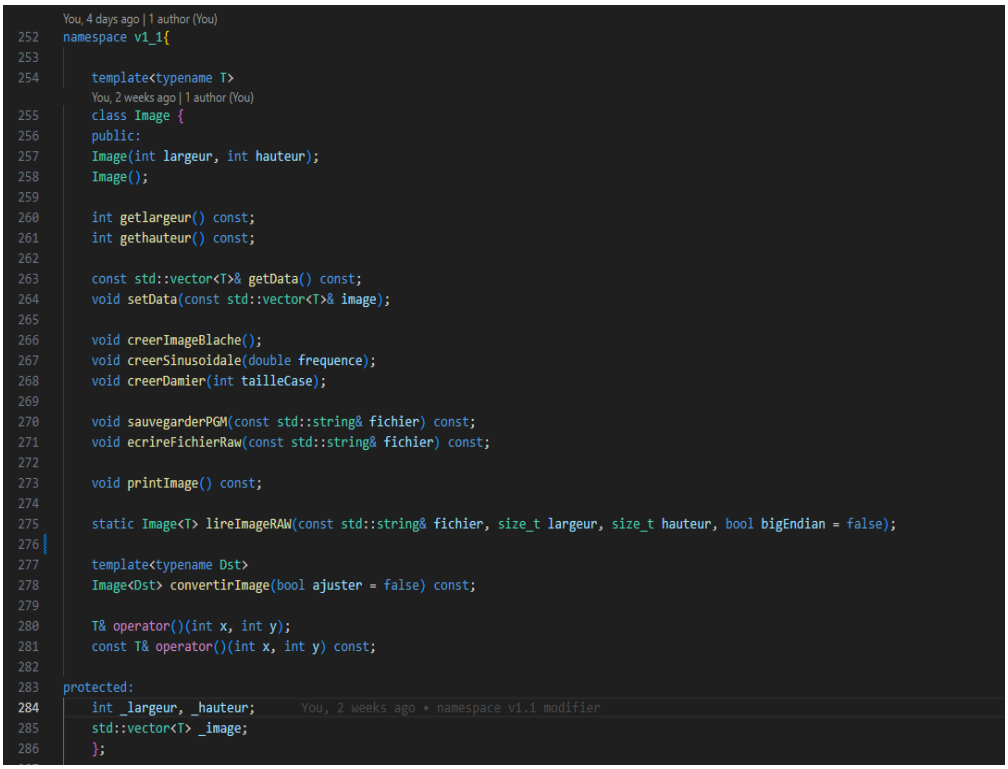
L'objectif du namespace v1_1 est de reprendre les mêmes fonctionnalités de v1_0 en adoptant une approche orientée objet. On utilise une classe générique et ***std::vector*** pour coder des images**,** ce qui rend la gestion plus claire et structurée.

Deux classes principales sont définies : ***Image***, qui gère les opérations de base (allocation d'image, création des images, lecture/écriture des fichier brut, conversion de type à un autre), et ***ImageRGB***, qui hérite de la class ***Image*** pour traiter les images couleur et appliquer des ***LUT*** spécifiques aux images en niveau de gris.

6.2 Implémentation des fonctionnalités de namespace v1.0 dans le cadre d'une class

L'image ci-dessus représente la class Image de type ***template*** (un type générique), qui peut fonctionner avec n'importe quel type de données (float, uint8_t, uint16_t, …), elle encapsule les dimensions de l'image (**_largeur**, **_hauteur**), ainsi que la structure de stockage des pixels avec ***std::vector*** qui sert à stocker tous les pixels de l'image sous forme d'un tableau comme attributs de la class.

Elle fournit aussi des méthodes pour la création d'images (**blanche**, **sinusoïdale**, **damier**), la lecture/écriture de fichiers (**PGM**, **RAW**), l'impression, la conversion de type d'image, et la surcharge de l'opérateur **parenthèse ()** pour accéder aux ***pixel (i, j)***.



```
You, 4 days ago | 1 author (You)
namespace v1_1{

    template<typename T>
    You, 2 weeks ago | 1 author (You)
    class Image {
    public:
    Image(int largeur, int hauteur);
    Image();

    int getlargeur() const;
    int gethauteur() const;

    const std::vector<T>& getData() const;
    void setData(const std::vector<T>& image);

    void creerImageBlache();
    void creerSinusoidale(double frequence);
    void creerDamier(int tailleCase);

    void sauvegarderPGM(const std::string& fichier) const;
    void ecrireFichierRaw(const std::string& fichier) const;

    void printImage() const;

    static Image<T> lireImageRAW(const std::string& fichier, size_t largeur, size_t hauteur, bool bigEndian = false);

    template<typename Dst>
    Image<Dst> convertirImage(bool ajuster = false) const;

    T& operator()(int x, int y);
    const T& operator()(int x, int y) const;

protected:
    int _largeur, _hauteur;      You, 2 weeks ago • namespace v1.1 modifier
    std::vector<T> _image;
    };
```

Figure 19: Aperçu du code de la class Image

La class[8] ***ImageRGB*** est une class dérivé de la class ***Image*** conçue pour gérer les images en couleurs ***RGB***, elle prend une propriété ***_ImageRGB*** pour accéder aux données de pixels d'une image ***RGB***. Elle inclut également des méthodes pour lire/écrire des fichiers PPM, charger une LUT binaire, convertir une image RGB en niveaux de gris.

Cette classe propose aussi une **surcharge [9]de constructeurs[10]** :

- Le premier constructeur permet de créer une image **RGB** vide à partir d'une taille spécifiée (largeur * hauteur).

[8] **Une class** est un modèle qui sert à créer des objets, elle regroupe des attributs et des fonctions dans une structure cohérente

[9] **Surcharge de méthodes :** consiste a définir plusieurs méthodes portant le même nom mais avec des paramètres différents

[10] Un **constructeur** est une méthode prends le même nom de la class qui est appelée automatiquement lorsqu'un objet est créé**.**

- Le deuxième constructeur permet de convertir une image en niveaux de gris en une image **RGB** en utilisant une **LUT**.

```
You, seconds ago | 1 author (You)
class ImageRGB : public  Image<uint8_t>{

    public :
    //Surcgarge de constructeur
    ImageRGB(const Image<uint8_t>& rgbImage, int largeur, int hauteur);
    ImageRGB(const Image<uint8_t>& imageGris,  size_t Largeur, size_t Hauteur,const std::vector<uint8_t>& lut);

    const std::vector<uint8_t>& getImageRGB() const;
    void sauvegarderPPM(const std::string& fichier) const;

    static std::vector<uint8_t> chargerLUT(const std::string& fichier);
    static Image<uint8_t> convertRGB_Gris(const std::vector<uint8_t>& imageRGB, int largeur, int hauteur);
    static Image<uint8_t> lectureImageRawRGB(const std::string& fichier, size_t largeur, size_t hauteur, bool bigEndian = false);

    private:
    std::vector<uint8_t> _ImageRGB;

    };
```

Figure 20: Aperçu de code de la classe ImageRGB

7. Namespace version 2.0

Cette dernière version de la bibliothèque contient les bases de traitement d'image tel que, l'addition des images, égalisation d'histogramme et le filtre convolution.

7.1 Implémentation des traitements d'images

7.1.1 Processing 1&2

Les traitements utilisés dans cette version sont implémentés sous forme d'une class **template** prenant en paramètre une ou deux images. Ces classes héritent soit de la classe abstraite (class de base) Processing1, pour les traitements qui nécessitent une seule image en entrée, soit de la classe Processing2, pour les traitements qui nécessitent deux images en entrée.

Le diagramme de class suivant montrent l'architecture suivie :

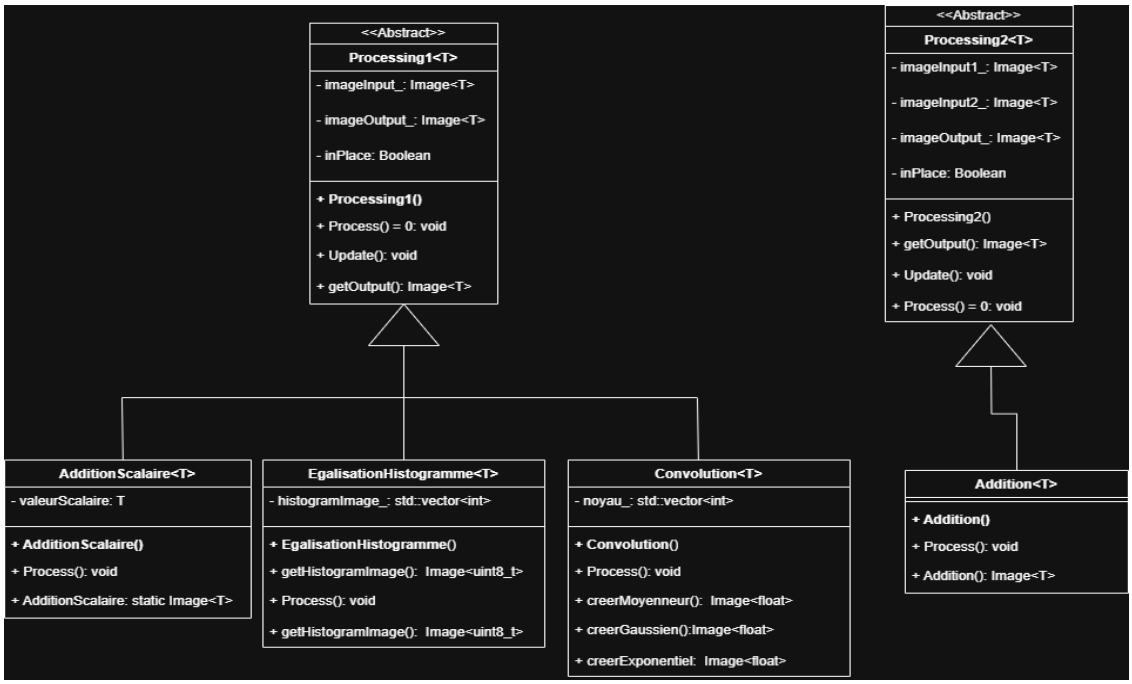


Figure 21: Diagramme de class suivie dans la bibliothèque namespace2.0

La classe Processing1 possède trois attributs :

- Une image d'entrée **imageInput_**
- Une image de sortie **imageOutput_**, accessible via la méthode **getOutput()**
- Un booléen **inPlace_** indiquant si le traitement doit écraser l'image originale.

Elle définit également une méthode virtuelle pure **Process()**, qui est appelée par la méthode **Update()** pour effectuer le traitement de base sur l'image

La figure suivante montre le code de la fonction Processing1 :

```
546
547     template<typename T>
        You, seconds ago | 1 author (You)
548     class Processing1 {
549     public:
550         Processing1(v1_1::Image<T>& input, bool inPlace = false);
551
552         virtual void Process() = 0;
553         void Update();
554
555         v1_1::Image<T>& getOutput();
556
557     protected:
558         v1_1::Image<T>& imageInput_;
559         v1_1::Image<T> imageOutput_;
560         bool inPlace_;
561     };
562
```

Figure 22: Aperçu de code de la classe Processing 1

La class Processing2 qui est utilisé pour les traitements qui nécessitent deux images en entrée, elle possède 4 attributs protégés :

- **imageInput_** : image d'entrée
- **imageOutput_** : image de sortie (accessible via la méthode **getOutput()**)
- **inPlace_** : booléen permettant d'indiquer si le traitement est effectué en place (modification directe de l'image d'entrée).

Elle possède également d'une méthode virtuelle pure **Process()** à redéfinir et une méthode **Update()** pour déclencher le traitement.

La figure suivante montre le code de la class processing2() ;

```
567
568   //Constructeur
569         Processing2(v1_1::Image<T>& input1, v1_1::Image<T>& input2, bool inPlace = false);
570   //Methodes
571         virtual void Process() = 0;
572
573         void Update();
574
575         v1_1::Image<T>& getOutput();
576
577      protected:
578   //attributs
579         v1_1::Image<T>& imageInput1_;
580         v1_1::Image<T>& imageInput2_;
581         v1_1::Image<T> imageOutput_;
582         bool inPlace_;
583      };
584
```

Figure 23: Aperçu de code de la classe Processing 2

7.1.2 Addition des images

7.1.2.1 Addition d'une valeur scalaire à une image

La class **AdditionScalaire** est une class Template qui hérite de la class **Processing1**, ce qui signifié quelle prends une seule image en entrée. Elle permet d'ajouter une valeur scalaire à chaque pixel de cette image. Elle contient un constructeur pour initialiser l'image, la valeur scalaire (**valScalaire**) et **boolean inPlace** qui permet d'indiquer si l'opération modifie l'image originale, elle contient aussi la méthode **Process** effectue le traitement principal en surchargeant la méthode virtuelle de la class mère. Elle dispose également d'une méthode statique **additionScalair**, qui permet de faire le traitement sans qui créer des instances de la class.

```
617
618   // Addition avec un scalaire
619   template<typename T>
620   class AdditionScalaire : public Processing1<T> {
621   public:
622       AdditionScalaire(v1_1::Image<T>& input, T valScalaire, bool inPlace = false);
623
624       void Process() override;
625       static v1_1::Image<T> additionScalaire(const v1_1::Image<T>& input, T valScalaire);
626   private:
627       T valScalaire_;
628   };
629
630
```

Figure 24: Aperçu de code de la classe Addition avec un scalaire

- La méthode **process()** qui permet de faire le traitement de l'addition d'une image avec une valeur scalaire. Voici le code correspondant :

```
598  template<typename T>
599  void AdditionScalaire<T>::Process() {
600      size_t largeur = this->imageInput_.getlargeur();
601      size_t hauteur = this->imageInput_.gethauteur();
602      v1_1::Image<T>& imageSortie = this->inPlace_ ? this->imageInput_ : this->imageOutput_;
603
604      for (size_t y = 0; y < hauteur; ++y) {
605          for (size_t x = 0; x < largeur; ++x) {
606              T val = this->imageInput_(x, y) + valScalaire_;
607
608              // Saturation (valeur maximale selon le type T)
609              if (std::numeric_limits<T>::is_integer) {
610                  val = std::min<T>(val, std::numeric_limits<T>::max());
611              }
612
613              imageSortie(x, y) = val;
614          }
615      }
616  }
```

Figure 25: le traitement de l'addition d'une image avec une valeur scalaire

Le résultat obtenu après l'addition d'une image avec une valeur scalaire est illustré dans les figures suivantes :

Figure 26: Aperçu d'une image avant l'addition avec un scalaire

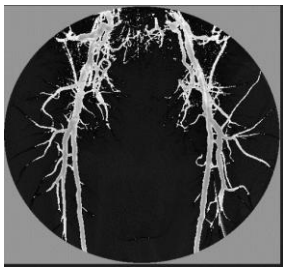


Figure 27: Addition d'une image après l'addition avec un scalaire

7.1.2.2 Addition de deux images

La class **Addiition** est aussi une class **template** qui hérite de la class **Processing2**, indiquant qu'elle prend deux images en entrée. Son constructeur prend deux image **input1** et **input2** ainsi qu'un **boolean inPlace** qui indique si le résultat doit écraser la première image. L'addition de deux images se fait comme suit :

- Si les deux images ont les mêmes dimensions, l'addition se fait pixel par pixel, pour avoir une image du même format en sortie.

- Si leurs dimensions sont différentes, l'image la plus petite est d'abord étendue par l'ajout des zéros (padding), pour correspondre à la taille de l'image la plus grande avant d'effectue l'addition.

```
600
601     // Addition de deux images
602     template<typename T>
        You, 4 days ago | 1 author (You)
603     class Addition : public Processing2<T> {
604     public:
605     //constructeur
606         Addition(v1_1::Image<T>& input1, v1_1::Image<T>& input2, bool inPlace = false);
607
608         void Process() override;
609
610         static v1_1::Image<T> addition(const v1_1::Image<T>& imageInput1, const v1_1::Image<T>& imageInput2);
611     };
612
613
```

Figure 28: Aperçu de code de la classe addition de deux images

- La méthode **process()** qui permet de faire le traitement de l'addition de deux images. Voici le code correspondant :

```
551         template<typename T>
552         void Addition<T>::Process() {
553             size_t largeur1 = this->imageInput1_.getlargeur();
554             size_t hauteur1 = this->imageInput1_.gethauteur();
555             size_t largeur2 = this->imageInput2_.getlargeur();
556             size_t hauteur2 = this->imageInput2_.gethauteur();
557
558             size_t largeurFinale = std::max(largeur1, largeur2);
559             size_t hauteurFinale = std::max(hauteur1, hauteur2);
560
561             v1_1::Image<T> imageTemp(largeurFinale, hauteurFinale);
562
563             for (size_t y = 0; y < hauteurFinale; ++y) {
564                 for (size_t x = 0; x < largeurFinale; ++x) {
565                     T val1 = (x < largeur1 && y < hauteur1) ? this->imageInput1_(x, y) : 0;
566                     T val2 = (x < largeur2 && y < hauteur2) ? this->imageInput2_(x, y) : 0;
567
568                     imageTemp(x, y) = val1 + val2;
569                 }
570             }
571             if (this->inPlace_) {
572                 this->imageInput1_ = std::move(imageTemp);
573             } else {
574                 this->imageOutput_ = std::move(imageTemp);
575             }
576         }
```

Figure 29: le traitement de l'addition de deux images

Les résultats obtenus après l'addition des deux images sont illustrés dans les figures suivantes

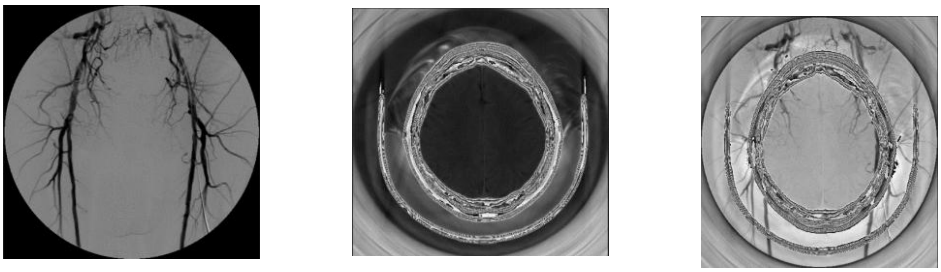


Figure 30: Résultat d'addition de deux images de même dimension

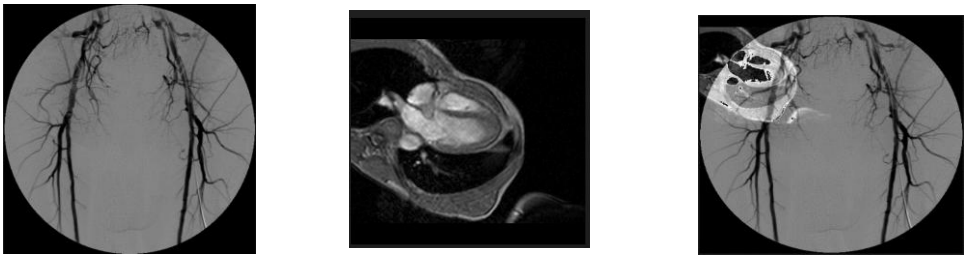


Figure 31: Résultat de l'addition de deux images de différentes dimensions

7.1.3 Égalisation d'histogramme

L'égalisation d'histogramme est une technique de traitement d'image utilisée pour améliorer le contraste des images. Elle consiste à repartir les niveaux de gris d'une image de manière uniforme, pour que tous les niveaux de luminosité soient mieux représentés.

Il est calculé en trois étape principale :

- **Calcule de l'histogramme :**

Un histogramme d'image est une représentation graphique (vecteur) qui montre la répartition des pixels selon leur intensité lumineuse (de 0 à 255). Par exemple :

  - Une image sombre aura un histogramme concentré à gauche.
  - Une image très claire aura un histogramme concentré à droite

- **Calcule de la fonction de distribution cumulative CDF**

La CDF indique pour chaque niveau d'intensité (de 0 à 255), combien de pixels dans l'image où les valeurs inferieurs ou égale à ce niveau. Elle est essentielle pour redistribuer les niveaux d'intensité de manière uniforme.

- **Transformation des niveaux de gris (via LUT)**

Consiste à créer une table LUT pour remplacer les anciennes valeurs de pixels par les nouvelles valeurs calculés

L'image suivante montre le code de la class d'égalisation d'histogramme

```
767
768     // la class Égalisation d'histogramme
769 template<typename T>
    ...
770 class egalisationHistogram : public Processing1<T> {
771 public:
772     egalisationHistogram(v1_1::Image<T>& input, bool inPlace = false);
773
774     void Process() override;
775
776     v1_1::Image<uint8_t> getHistogramImage();
777
778
779    void compterHistogram(const v1_1::Image<T>& image);
780 private:
781     std::vector<int> histogramImage_;
782 };
783       You, 3 weeks ago • ajouter de namespace v2.0 a TER3
```

Figure 32 : Aperçu de code de la classe égalisation d'histogramme

Les étapes de calcul de l'histogramme des images sont implémentées dans la méthode **process()** et illustrées dans la figure suivante.

```
647     template<typename T>
648 void egalisationHistogram<T>::Process() {
649     static_assert(std::is_same<T, uint8_t>::value, "egalisation d'Histogram ne supporte que uint8_t");
650
651     size_t w = this->imageInput_.getlargeur();
652     size_t h = this->imageInput_.gethauteur();
653     size_t total = w * h;
654
655     v1_1::Image<T>& output = this->inPlace_ ? this->imageInput_ : this->imageOutput_;
656     output = v1_1::Image<T>(w, h);
657
658     // 1. Histogramme d'entrée
659     histogramImage_ = std::vector<int>(Count: 256, Val: 0);
660     for (auto val : this->imageInput_.getData()) {
661         histogramImage_[val]++;
662     }
663     // 2. CDF
664     std::vector<int> cdf(Count: 256);
665     cdf[0] = histogramImage_[0];
666     for (int i = 1; i < 256; ++i)
667         cdf[i] = cdf[i - 1] + histogramImage_[i];
668
669     // 3. LUT
670     std::vector<uint8_t> lut(Count: 256);
671     for (int i = 0; i < 256; ++i)
672         lut[i] = static_cast<uint8_t>(255.0 * cdf[i] / total);
673
674     // 4. Appliquer LUT
675     for (size_t y = 0; y < h; ++y)
676         for (size_t x = 0; x < w; ++x)
677             output(x, y) = lut[this->imageInput_(x, y)];
678
679     // 5. Recalculer histogramme après égalisation
680     compterHistogram(image: output);
681 }
```

Figure 33: Aperçu de calcule d'histogramme

Les figures suivantes montrent l'image originale et son histogramme :

Figure 35 Image avant l'égalisation d'histogramme

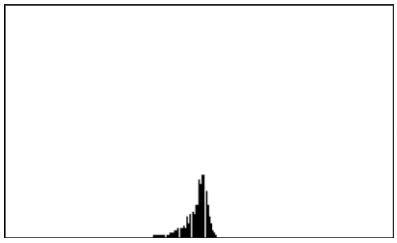


Figure 34 Histogramme de l'image avant l'égalisation

Son résultat après l'application de l'égalisation de l'histogramme :

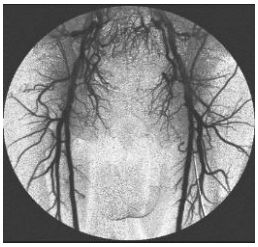


Figure 36: Image après l'égalisation d'histogramme

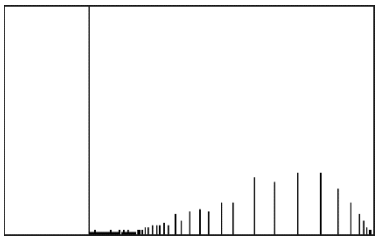


Figure 37: Histogramme de l'image après l'égalisation

7.1.4 Filtrage par convolution

7.1.4.1 Introduction

La convolution est une technique utilisée en traitement d'images. Elle consiste en une opération de multiplication de deux matrices de tailles différentes (généralement une petite et une grande), mais de même dimensionnalité semblable (1D, 2D ou 3D), produisant une nouvelle matrice**. [12]**

La convolution est donc le traitement d'une matrice image par une autre petite matrice appelée matrice de convolution, le filtre ou noyau (kernel).

Le filtre parcourt toute la matrice de l'image de manière incrémentale et génère une nouvelle matrice constituée des résultats de la multiplication.

Le filtre étudie successivement chacun des pixels de l'image. Pour chaque pixel, que nous appellerons pixel initial**,** il multiplie la valeur de ce pixel et de chacun des 8 pixels qui l'entourent par la valeur correspondante dans le noyau. Il additionne l'ensemble des résultats et le pixel initial prend alors la valeur du résultat final. Ainsi la formule de convolution est définie comme suit :

$$Y_{ij=} \sum_{u=-k}^{k} \sum_{v=-k}^{k} H_{u,v} \,.\, X_{i-u,j-v}$$

La figure suivante montre l'exemple simple de produit de convolution.

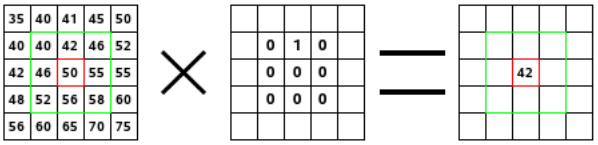


Figure 38: image explicative sur la convolution

7.1.4.2 Les types des filtres (noyaux)

En traitement d'image plusieurs types de filtres (noyaux) peuvent utilisés selon le cas recherché.**[13]**

Voici quelques filtres les plus courant :

- **Filtre Moyenneur :**

Est utilisé pour réduire le bruit et obtenir un lissage uniforme de l'image, mais il peut flouter les contours.

Il remplace chaque pixel de l'image par la moyenne de ces voisins. Par exemple si on prend un noyau de 3x3 contient des coefficients égaux à 1/9. Sa forme est :

$$K = \frac{1}{9}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

- **Filtre Gaussien :**

Ce filtre est appliqué lorsqu'on souhaite un flou plus naturel tout en préservant les bords. Il repose sur la distribution gaussienne, il applique des poids plus élevés au pixel central et plus faibles aux pixels plus éloignés, contrairement au filtre moyenneur (où tous les voisins ont le même poids).

Le filtre gaussien est calculé à partir de la formule mathématique suivante :

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\delta^2} \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{2\delta^2}}$$

- x, y : distance au centre du noyau
- ○ (sigma) : écart-type (contrôle l'intensité du flou)

La matrice de son noyau est représentée par :

$$K = \frac{1}{16}\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

- **Filtre exponentiel :**

Le filtre exponentiel dit aussi filtre de lissage (filtrage lisseur), est principalement utilisé pour rajouter de flou dans image et pour réduire certains types de bruit. Ce filtre est calculé à partir de la formule suivante :

$$K(x,y) = e^{-\lambda.\sqrt{(x-c)^2+(y-c)^2}}$$

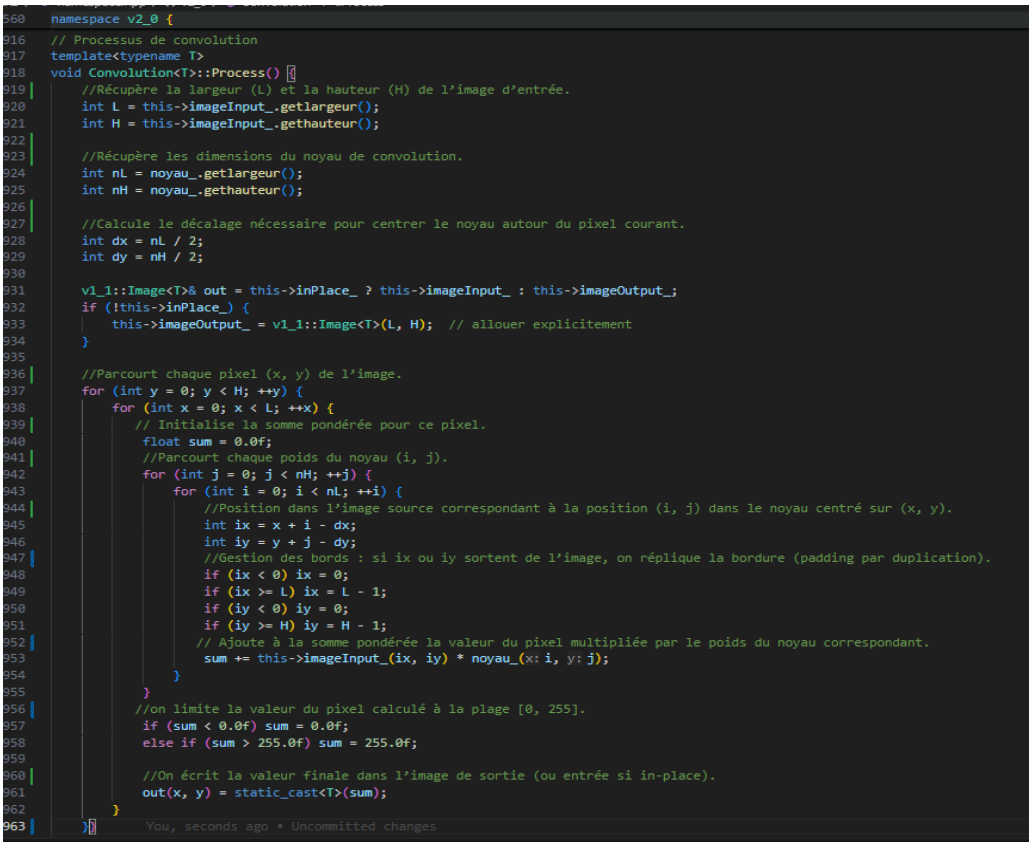
- λ: contrôle la rapidité de décroissance (équivalent de σ pour Gaussien)
- **c** : est le centre du noyau

L'image suivante montre le code de la classe Convolution qui hérite de la classe **Processing1**. Elle contient un constructeur prenant en paramètre une image d'entrée, un noyau de convolution ainsi qu'un booléen optionnel **inPlace** pour déterminer si le traitement modifie directement l'image originale, elle contient aussi une méthode **Process()** qui permet d'appliquer l'opération de convolution. La classe propose également trois méthodes statiques : **creerMoyenneur()**, **creerGaussien()** et **creerExponentiel()**, qui permettent respectivement de générer des noyaux de convolution de type moyenneur, gaussien et exponentiel

```
885
886  template<typename T>
     You, seconds ago | 1 author (You)
887  class Convolution : public Processing1<T> {
888  public:
889      Convolution( v1_1::Image<T>& image, const v1_1::Image<float>& noyau, bool inPlace = false);
890
891      void Process() override;
892
893      static v1_1::Image<float> creerMoyenneur(int taille);
894      static v1_1::Image<float> creerGaussien(int taille, float sigma);
895      static v1_1::Image<float> creerExponentiel(int taille, float lambda);
896
897  private:
898      v1_1::Image<float> noyau_;
899  };
900
```

Figure 39: Aperçu de la class Convolution

Les étapes de calcul de convolution des images sont implémentées dans la méthode **process()** et illustrées dans la figure suivante.



```
namespace v2_0 {
// Processus de convolution
template<typename T>
void Convolution<T>::Process() {
    //Récupère la largeur (L) et la hauteur (H) de l'image d'entrée.
    int L = this->imageInput_.getlargeur();
    int H = this->imageInput_.gethauteur();

    //Récupère les dimensions du noyau de convolution.
    int nL = noyau_.getlargeur();
    int nH = noyau_.gethauteur();

    //Calcule le décalage nécessaire pour centrer le noyau autour du pixel courant.
    int dx = nL / 2;
    int dy = nH / 2;

    v1_1::Image<T>& out = this->inPlace_ ? this->imageInput_ : this->imageOutput_;
    if (!this->inPlace_) {
        this->imageOutput_ = v1_1::Image<T>(L, H);  // allouer explicitement
    }

    //Parcourt chaque pixel (x, y) de l'image.
    for (int y = 0; y < H; ++y) {
        for (int x = 0; x < L; ++x) {
            // Initialise la somme pondérée pour ce pixel.
            float sum = 0.0f;
            //Parcourt chaque poids du noyau (i, j).
            for (int j = 0; j < nH; ++j) {
                for (int i = 0; i < nL; ++i) {
                    //Position dans l'image source correspondant à la position (i, j) dans le noyau centré sur (x, y).
                    int ix = x + i - dx;
                    int iy = y + j - dy;
                    //Gestion des bords : si ix ou iy sortent de l'image, on réplique la bordure (padding par duplication).
                    if (ix < 0) ix = 0;
                    if (ix >= L) ix = L - 1;
                    if (iy < 0) iy = 0;
                    if (iy >= H) iy = H - 1;
                    // Ajoute à la somme pondérée la valeur du pixel multipliée par le poids du noyau correspondant.
                    sum += this->imageInput_(ix, iy) * noyau_(x: i, y: j);
                }
            }
            //on limite la valeur du pixel calculé à la plage [0, 255].
            if (sum < 0.0f) sum = 0.0f;
            else if (sum > 255.0f) sum = 255.0f;

            //On écrit la valeur finale dans l'image de sortie (ou entrée si in-place).
            out(x, y) = static_cast<T>(sum);
        }
    }
}
```

Figure 40:Aperçu de la méthode process() pour le calcul de convolution

8. Conclusion

Le traitement d'image joue un rôle fondamental dans plusieurs domaines notamment la vision ordinateur, robotique et l'intelligence artificielle. Il sert à améliorer la qualité des images pour faciliter l'interprétation dans les traitements plus complexe comme la classification ou l'apprentissage automatique.

Le travail réalisé dans le cadre de ce rapport s'inscrit sur le développement d'une bibliothèque de traitement d'images en C++ structuré en trois version successives (namespace v1.0, namespace v1.1, et namespace v2.0).

Namespace v1.0 est une sous bibliothèque qui regroupe les fonctionnalités de base pour le traitement d'images. Elle inclut les fonctions pour allouer dynamiquement des images, la création des image blanche, damier et sinusoïdal, la lecteur et l'écriture des fichier images en format brut (. RAW) selon leur type de codage **big** ou **little endian**, ainsi que la conversion entre types d'images. Elle contient également des fonctions qui permet de transformer des images en couleur **RGB** en niveau de gris (noir et blanc) en utilisant une table correspondance (**LUT**).

La version 1.1 (namespace v1.1) est une évolution de la version 1.0 vers une architecture orienté objet, afin de bien organiser et structurer le code. Cette version introduit une **class template Image** qui encapsule les fonctionnalités de bases liées à la gestion des images, telles que l'allocation des images, la création des images simple (images blanches, damiers, et sinusoïdale), la lecture et l'écriture des fichier image brut (.RAW), ainsi que la conversion entre ces différents types. Une class dérivée **ImageRGB** a également été introduite pour gérer les images en couleur (RGB). Cette architecture rend le code plus modulaire pour faciliter leur utilisation dans la prochaine version.

Le namespace v2.0 représente la dernière version de cette bibliothèque, dont l'objectif l'implémentation de fonctionnalités plus avancées de traitement d'image. Cette version intègre des class Template ou abstract héritant de la class **Image**, afin de gérer des traitement complexe sur l'images. Elle permet d'additionner deux images de même ou de différentes dimensions, l'addition d'une image avec une valeur scalaire, le calcule d'histogramme pour améliorer le contraste, ainsi qu'une class pour le calcul de convolution, utilisée pour réduire le flou et le bruit dans les images.

9. Perspectives

Dans les perspectives d'améliorer cette bibliothèque de traitement d'image en C++ plusieurs fonctionnalités peuvent être ajouter :

- Filtrage par multiplication dans le domaine fréquentiel, avec des tests sur des images avec le filtre idéal et le filtre Butterworth
- Détection de contours par filtrage de Sobel
- Le multi seuillage ainsi que le seuillage d'Otsu
- Enfin, l'intégration d'algorithme de classification comme k-moyennes

Ces améliorations permettraient d'améliorer la capacité de la bibliothèque afin de mieux répondre aux besoins en traitement d'images

10. Bibliographie

[1] **https://ticinformatique.wordpress.com/2019/10/22/la-notion-dimage**

[2] **https://www.mediathequesludotheques.grandorlyseinebievre.fr/default/limage-au-temps-du-numerique.aspx?_lg=fr-FR**

[3] **https://fac.umc.edu.dz/fstech/cours/Electronique/Master%20ST%C3%A9l%C3%A9com/CoursImageProcessing1.pdf**

[4] **https://www.lcd-compare.com/definition-de-look-up-table.htm**

[5] **https://fr.wikipedia.org/wiki/Image_num%C3%A9rique**

[6] **https://perso.univ-lyon1.fr/erwan.guillou/files/CM%20-%20complet.pdf**

[7] **https://www.umr-lastig.fr/plf_homepage/cours/cours_ima/ima_numeriques.pdf**

[8] **https://perso.univ-lyon1.fr/erwan.guillou/files/CM%20-%20complet.pdf**

[9] **http://ressources.unit.eu/cours/videocommunication/Transformation_ponctuelle_histogramme.pdf**

[10] **https://openclassrooms.com/fr/courses/7137751-programmez-en-oriente-objet-avec-c#table-of-content**

[11] **https://chatgpt.com/auth/login**

[12] **https://wp.unil.ch/risk/files/2015/12/8.-Filtres-et-convolution.pdf**

[13] **https://mathinfo.alwaysdata.net/2016/11/filtres-de-convolution**

[14] **https://labsticc.univ-brest.fr/~rodin/FTP/Enseignements/L3/ProjetsIUP/old/ProjetImage/Filtrage.pdf**

[15] **https://medium.com/%40er_95882/convolution-image-filters-cnns-and-examples-in-python-pytorch-bd3f3ac5df9c**

[16] **https://openclassrooms.com/fr/courses/4470531-classez-et-segmentez-des-donnees-visuelles/5026661-filtrez-une-image**

[17] **https://perso.esiee.fr/~perretb/I5FM/TAI/convolution/index.html**

[18] **https://perso.ensta-paris.fr/~manzaner/Cours/Poly/Poly_Chap2_Filtrage.pdf**

[19] **https://github.com/daehli/image-processing**

[20] **https://perso.esiee.fr/~perretb/I5FM/TAI/histogramme/index.html**

[21] **http://ressources.unit.eu/cours/videocommunication/UNIT_Image%20Processing_nantes/Version%20FR/Chapitre%202/Ressources/Transformation%20d'histogramme/Rchap2_TransfoHisto_FR[final].pdf**