

Ressources nationales pour la terminale S

Thème : Agir: les défis du XXI siècle ; Transmettre et stocker de l'information ; Images numériques: caractéristique d'une image numérique-pixélisation, codage RVB et niveaux de gris
Type de ressources : Documentaires ; Numérique
Notions et contenus : Travail sur l'image numérique.
Compétence travaillée ou évaluée : mobiliser ses connaissances ; Présenter les résultats obtenus ; Maîtriser les compétences mathématiques de base ; Calcul d'erreur ; Proposer et réaliser un protocole comprenant des expériences ; Confronter des représentations avec la réalité ; Porter un jugement critique sur la pertinence des résultats obtenus ; Analyser des mesures ; Estimer la précision des mesures ; Écrire des résultats de façon adaptée ; Mener des expériences assistées par ordinateur ; Traiter des mesures ; Extraire la valeur scientifique des informations ; Identifier les différentes sources d'erreur lors de la mesure, Évaluer et comparer les incertitudes ; Maîtriser l'usage des chiffres significatifs.
Nature de l'activité : découvrir les caractéristiques d'une image numérique et travailler sur les compétences « extraire » et « exploiter » qui occupent une place centrale en terminale S. Travail qualitatif et quantitatif sur les différents types d'images (mode point et vectorielles) ainsi que sur les notions de résolution spatiale et colorimétrique à l'aide du logiciel libre « <i>The Gimp</i> » qui est un programme de création graphique et de retouche photo très puissant, et du logiciel libre « <i>inkscape</i> » qui est un programme de création de dessin vectoriel.
Résumé (en 5 lignes au plus) : réinvestissement des connaissances et compétences acquises lors du chapitre <u>propriétés des ondes-Interférences</u> : « <i>Pratiquer une démarche expérimentale visant à étudier quantitativement le phénomène d'interférence dans le cas des ondes lumineuses monochromatique</i> ». Réinvestissement charnière entre les démarches « comprendre » et « agir » à l'aide du logiciel « <i>The Gimp</i> ».
Mots clefs : numérique ; image ; fichier ; résolution ; pixelisation ; codage RVB ; niveau de gris
Académie où a été produite la ressource : Nancy-Metz

Introduction à l'image numérique

Document destiné aux enseignants

LHP

2 mars 2012

Table des matières

1 Objet d'étude	2
2 Représentation binaire	2
2.1 Représentation des nombres entiers	2
2.2 Représentation des autres nombres	2
3 De l'image analogique à l'image numérique	3
3.1 Discrétisation spatiale	3
3.2 Discrétisation colorimétrique en niveaux de gris	4
3.3 Discrétisation colorimétrique en couleurs	4
3.3.1 8 bits, 16 bits, 24 bits	4
3.3.2 Toujours plus fort : 32 bits	5
3.3.3 Palette indexée sur 8 bits	5
4 Taille, définition, résolution	6
4.1 Résolution	6
4.2 Définition	6
5 Périphériques	7
5.1 Les écrans	7
5.2 Les imprimantes	7
5.2.1 Résolution d'image et résolution d'impression	8
5.2.2 Choisir une résolution adaptée	8
5.3 Video-projecteur	8
5.4 Gestion de couleurs	9
5.4.1 Gamut	9
5.4.2 Calibrage	11
5.4.3 Profils ICC	11
6 Format d'images	12
7 Images vectorielles	12
8 Logiciels	13

Pixels, rasterisation, dpi, 24 bits, jpeg, bitmap, png, vectorisation, RVB, HSL, CMYK... ...n'en jetez plus ! L'image numérique est en effet très jargonnante. Le présent document se veut une démystification de ce jargon et une présentation simple et volontairement incomplète des images numériques.

Licence

Le présent document est distribué sous licence CC-BY-SA-NC.

1 Objet d'étude

Le terme « image numérique » participe de plusieurs aspects :

- ce qui est dans la mémoire vive de l'ordinateur au moment où utilise l'image ;
- ce qui est affiché sur un écran numérique (écran plat) ;
- ce qui est vidéoprojeté ;
- ce qui est imprimé ;
- le fichier qui est sur votre disque dur ou votre clé USB, appareil photo, téléphone portable, etc.

Chacun de ces aspects est abordé simplement et des développements plus approfondis sont reportés en annexe pour ne pas alourdir la lecture. Un glossaire regroupe les termes les plus usités du jargon.

2 Représentation binaire

Les ordinateurs fonctionnent en manipulant uniquement des 0 et des 1. Toutes les données manipulées — et en particulier les images — doivent donc être représentées par des 0 et des 1 : on parle de représentation binaire de l'information. L'élément d'information représenté par un zéro ou un 1 est le bit. Historiquement, on compte les bits par paquets de 8 appelés octets.

2.1 Représentation des nombres entiers

Regardons ce qu'on peut représenter avec un octet. Chaque bit peut prendre 2 valeurs, 0 ou 1. Avec 8 bits, on peut donc représenter $2^8 = 256$ valeurs, de 0 à 255.

Exemples :

en décimal	en binaire	en décimal	en binaire
0	0	9	1001
1	1	42	101010
2	10	143	10001111
3	11	255	11111111

2.2 Représentation des autres nombres

On peut représenter des nombres décimaux, des nombres négatifs, des nombres en notation scientifique mais seul les entiers nous importent pour les images. Le lecteur intéressé trouvera en annexe quelques compléments pour les autres nombres.

3 De l'image analogique à l'image numérique

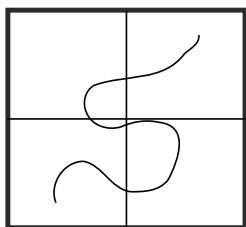
3.1 Discréétisation spatiale

Le problème fondamental pour représenter une image est sa variation continue. Un dégradé de luminosité entre deux zones de l'image est une variation continue. Or l'ordinateur travaille avec des nombres entiers, donc discontinus. Il faut donc passer du continu au discret : c'est la discréétisation. Elle est effectuée par le scanner ou l'appareil photo numérique.

On peut voir ce processus comme le découpage de l'image selon une grille. Chaque case de cette grille donne un point de l'image nommé pixel. Il est représenté par un bit de valeur 1 si le pixel est allumé et de valeur 0 dans le cas contraire. L'image numérique est obtenue en affichant un pixel pour chaque case.

Exemple :

Considérons l'image d'un trait simple. En discréétisant, on obtient l'image qui sera affichée, manipulée par l'ordinateur, ou imprimée :



image

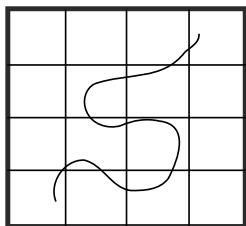
1	1
1	1

discréétisation



image numérique

L'image de droite donne une piètre représentation de l'image originale ! La grille de discréétisation est bien trop grossière. On obtient des meilleurs résultats avec des grilles plus fines.



image

0	0	1	1
0	1	1	0
1	1	1	0
1	1	1	0

discréétisation

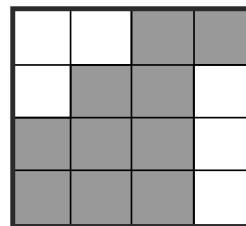
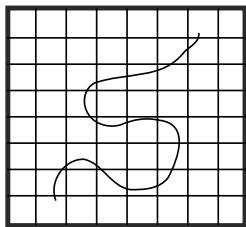


image numérique



image

0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	1	1	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	1	1	1	0	0	0	0	0
0	1	0	1	1	1	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0

discréétisation

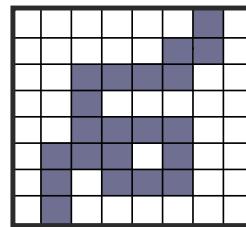


image numérique

Mais une grille plus fine a son revers : il faut plus de mémoire pour stocker l'image. Ainsi dans la première grille on a 4 bits qui se contentent d'un demi-octet tandis que pour la troisième il faut compter 8 octets pour les 64 bits.

3.2 Discréétisation colorimétrique en niveaux de gris

La discréétisation spatiale précédente limite les couleurs au noir et blanc. Pour aller au delà et avoir du gris, on affecte à chaque pixel de l'image, non plus 1 bit, mais plusieurs. Avec quatre bits par pixel, on obtient $2^4 = 16$ niveaux de gris et avec huit bpp (bits par pixel), on peut en avoir 256, ce qui donne une impression de dégradé de gris continu¹ :



FIGURE 1: Niveau de gris sur 4 bits et 8 bits

Évidemment, à 8 bpp, il faut 8 fois plus de mémoire qu'à 1 bpp pour représenter l'image.

3.3 Discréétisation colorimétrique en couleurs

Pour représenter les couleurs, on procéde le plus souvent par synthèse additive du rouge du vert et du bleu : on parle de codage RVB (ou RGB en jargon). Selon le nombre de bits utilisés pour coder une couleur, on pourra représenter des dégradés plus moins fins.

3.3.1 8 bits, 16 bits, 24 bits

Au temps des dinosaures, dans les années 80, la définition colorimétrique des images était faible : 16 couleurs \equiv 4 bits puis 256 \equiv 8 bits.

Aujourd'hui, on est plutôt sur 16 bits pour le bas de gamme, la situation courante étant 24 bits². Une image 16 bits donne accès à 65536 couleurs et pour 24 bits, on atteint 16777216 : à quoi bon ? Contrairement à ce qu'on pourrait croire, un oeil humain éduqué discerne tout de même 10 millions de couleurs³ ! À 23 bits de résolution, on est un peu court avec 8 millions de couleurs. De plus les échanges de données entre les éléments de l'ordinateur (mémoire, processeur, disque) se font par nombres entiers d'octets, d'où le choix de 24 bits, c'est à dire 3 octets.

Les exemples ci-dessous montrent la même image représentée en 4, 8 et 24 bits. Tout comme pour la résolution spatiale, plus la discréétisation colorimétrique est fine, plus taille du fichier est grande.

1. Pour les puristes, il faut plutôt 12 bits

2. En jargon, une image est *HighColors* en 16 bits et *TrueColors* en 32 bits

3. L'oeil est ici une métonymie de l'appareil visuel : c'est le cerveau qui discerne



FIGURE 2: Résolutions colorimétrique

3.3.2 Toujours plus fort : 32 bits

Les huit bits supplémentaires ajoutés à un codage sur 24 bits sont destinés à gérer la transparence de l'image ; on parle de *canal alpha* de l'image. Cette information supplémentaire permet aux graphistes de gérer l'*alpha blending*, c'est à dire la superposition d'images.

Les graphistes professionnels vont même jusqu'à utiliser 48 bits par pixel. Mais il faut alors disposer d'un matériel particulier comme on le verra plus loin.

3.3.3 Palette indexée sur 8 bits

Il s'agit de coder chaque pixel non plus directement avec une couleur, mais avec un numéro de couleur, c'est à dire un index. On peut ainsi choisir les 256 couleurs les plus utilisées dans l'image *parmis* parmi les 16.7 millions d'un codage sur 24 bits. Les logiciels comme The Gimp⁴ font cela très bien automatiquement. La figure 3 montre une image en 24 bits convertie en 8 bit indexés et la palette générée par Gimp.

4. Voir annexe pour un tour d'horizon des logiciels libres adaptés au graphisme



FIGURE 3: Palette indexée

L'intérêt de cette technique est de limiter la dégradation de la qualité de l'image tout en réduisant la taille du fichier d'un facteur 3 environ, puisqu'on passe de 24 bits à 8 bits par pixel.

4 Taille, définition, résolution

Quel est le rapport entre le nombre de pixels et la taille de l'image ? Prosaïquement cela dépend de la taille des points.

4.1 Résolution

La résolution d'une image est le nombre de pixels par unité de longueur. En jargon, on parle de *dpi*⁵, c'est à dire de *point par pouce* ou ppp. La relation entre taille de l'image et résolution est simplement :

$$\text{nombre de pixels} = \text{taille} \times \text{résolution}$$

Une image de 15 cm à une résolution de 300 dpi est donc formée de :

$$15 \text{ cm} \times 300 \text{ pixel/pouce} \times \frac{1}{2,54} \text{ pouce/cm} \approx 1771 \text{ pixels}^6$$

4.2 Définition

La définition d'une image est son nombre total de pixels. On compte souvent les pixels par millions, c'est à dire par mégapixels. On retrouve là un argument commercial des vendeurs d'appareil photo.

Remarque : pour obtenir une très belle image, il faut d'abord un très bon objectif. Un capteur de 12 MPix derrière une lentille de mauvaise qualité permet juste d'avoir les défauts de cette lentille avec une grande précision !

5. *dots per inch*

6. « Puisqu'on vous dit depuis le début de l'année qu'il faut faire attention aux unités ! » ;-)

5 Périphériques

5.1 Les écrans

On se limite aux écrans plats, les antiques CRT⁷ étant aujourd’hui en fin de vie. Un écran a principalement 3 caractéristiques :

1. La taille qui est usuellement définie par la diagonale de l'image affichée, mesurée en pouces. Les tailles courantes vont de 10 à 17 pouces pour les portables et de 17 à 24 pouces pour les machines de bureau.
2. Le format donné par le rapport entre définition horizontale et verticale de la dalle. Le traditionnel 4/3 est aujourd’hui supplanté par les formats allongés 16/10 et 16/9.
3. Les définitions horizontales et verticales.

Le graphique ci-dessous rassemble les différentes possibilités et leur nom dans le jargon.

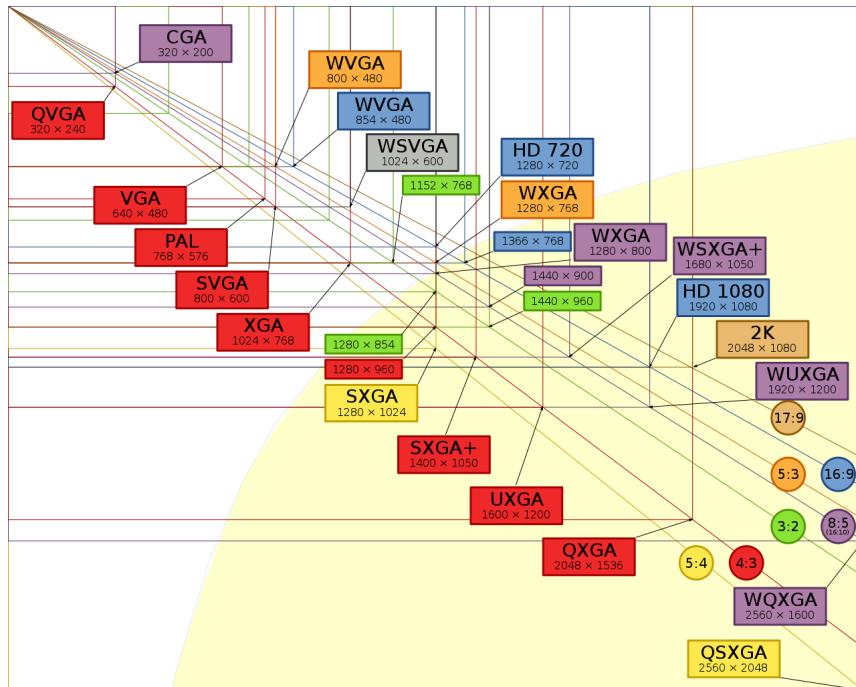


FIGURE 4: Les formats et résolutions graphiques

Un écran possède bien d'autres caractéristiques telles que, le type de dalle d'affichage, le temps de réaction, etc qui seront abordés en annexe.

5.2 Les imprimantes

Outre la technologie d'impression (jet d'encre, laser, sublimation, etc) une caractéristique intéressante de l'imprimante est sa résolution usuellement comprise entre 300 et 1200 dpi.

7. Cathode Ray Tube : écran à tube cathodique

5.2.1 Résolution d'image et résolution d'impression

Plus elle est élevée plus l'imprimante est capable d'imprimer une image finement discrétisée. Mais il ne sert à rien d'envoyer à l'imprimante une image à 600 dpi si l'impression se fait en 300 dpi : la qualité ne sera pas miraculeusement améliorée.

Alors qu'est-ce qu'on fait ?

On compte !

Par exemple supposons qu'on dispose d'une image de 1000 pixels de large que j'insère dans un document A4 avec des marges de 1,5 cm. La résolution de l'image est donc de :

$$\frac{1000 \text{ pixels}}{(21 - 2 \times 1,5) \text{ cm} \times \frac{1}{2,54} \text{ pouce/cm}} = \frac{2540}{18} \approx 140 \text{ dpi}$$

Inversement, si cette même image est imprimée en illustration de 6 cm de large au lieu de 18 cm comme précédemment, la résolution de l'image est alors de 420 dpi. Sur une imprimante à 300 dpi, on obtiendra pas le meilleur de l'image.

L'idéal est donc de travailler avec des résolutions d'image et d'impression identiques

5.2.2 Choisir une résolution adaptée

Pour un document écrit, la distance de lecture est de 30 à 40 cm. Il est conseillé de ne pas imprimer en dessous de 200 dpi pour un confort de lecture acceptable. En pratique les documents courants sont imprimés à 300 dpi. Les beaux documents peuvent être en 600 dpi voire 1200 dpi, mais un problème se pose alors : le papier. À partir de 600 dpi, le résultat obtenu mérite un papier couché ou glacé spécialisé.

Pour les grands documents comme les posters et les affiches, la distance de lecture est plus grande et la résolution d'impression peut être diminuée. Le tableau ci-dessous indique les limites de résolution de l'œil humain moyen.

Distance du support (cm)	Résolution (dpi)
6,3	1200
12,7	600
25,3	300
50	150
100	76
300	25
500	15

On notera qu'à 12,7 cm, on est souvent en deça du punctum proximum de bien des individus. Les résolutions meilleures que 600 dpi sont donc rarement utiles.

Remarque : il faut garder à l'esprit que la résolution d'un écran est de l'ordre de 90 dpi. Insérer une image en haute résolution sur un site web est non seulement inutile mais pénalisant : il faudra transférer une grande quantité de données à chaque fois et le site sera plus lent.

5.3 Video-projecteur

Les videos-projecteurs ont des « résolutions natives⁸ » assez faibles, typiquement 1024×768 en format 4/3 et 1280×800 en format « allongé » 16/10. La dimension de l'image projetée donnera sa résolution.

8. Le terme résolution est ici impropre mais il est consacré par l'usage

Par exemple les 1024 pixels projetés sur une image de 2 m de large correspondent à une résolution de :

$$\frac{1024 \text{ pixels}}{200 \text{ cm} \times \frac{1}{2,54} \text{ pouce/cm}} \approx 13 \text{ dpi}$$

D'après le tableau du 5.2.2, il faudrait être à plus de 5 m pour ne pas voir les pixels. En pratique, une image d'une définition d'un MPix⁹ est néanmoins correcte pour une projection jusqu'à 3 m de large.

Le problème des videos projecteurs est plus souvent dû à leur luminosité un peu faible. On la caractérise par le flux lumineux émis (en lumens). Pour une projection en 3m de large, un flux de 2500 lumens permet une projection plein jour à peu près confortable¹⁰. On gardera à l'esprit que doubler la distance de projection augmente d'un facteur quatre la surface projetée et donc diminue la luminosité d'autant.

5.4 Gestion de couleurs

Chacun a déjà été surpris par la différence des couleurs d'une image affichée à l'écran, puis imprimée ou projetée. Le problème tient à la capacité qu'ont les périphériques de reproduire une couleur particulière et à la correspondance d'un même codage de couleur d'un périphérique à l'autre.

Par exemple un beau bleu affiché sur votre écran de portable va donner une couleur qui dépend des réglages de l'écran ! Modifier ces réglages ne change en rien la représentation RVB de cette couleur. La correspondance entre le codage RVB et la couleur obtenue est donc fonction des réglages et des capacités de chaque périphérique.

5.4.1 Gamut

Le gamut d'un appareil est l'ensemble des couleurs qu'il peut reproduire. On le représente dans un diagramme de chromaticité normalisé :

9. MPix= megapixel = 10^6 pixels

10. Si votre intendant à vraiment trop de crédits, un video projecteur de 15000 lumens coûte environs 20 k€

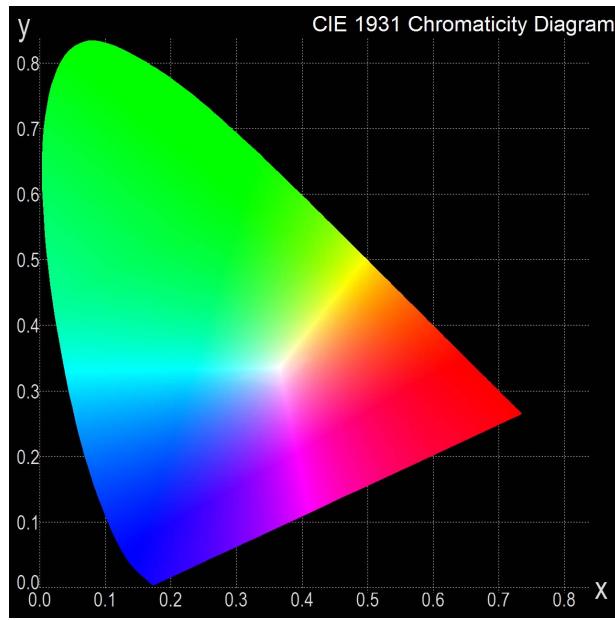


FIGURE 5: Diagramme normalisé CIE 1931

Ce diagramme représente l'ensemble des couleurs perçues par un oeil moyen. Sans entrer dans le détail des diagrammes de chromaticité¹¹ voyons l'usage que l'on peut en faire.

Considérons deux périphériques, un moniteur et une imprimante dont les gamuts sont représentés figure 6.

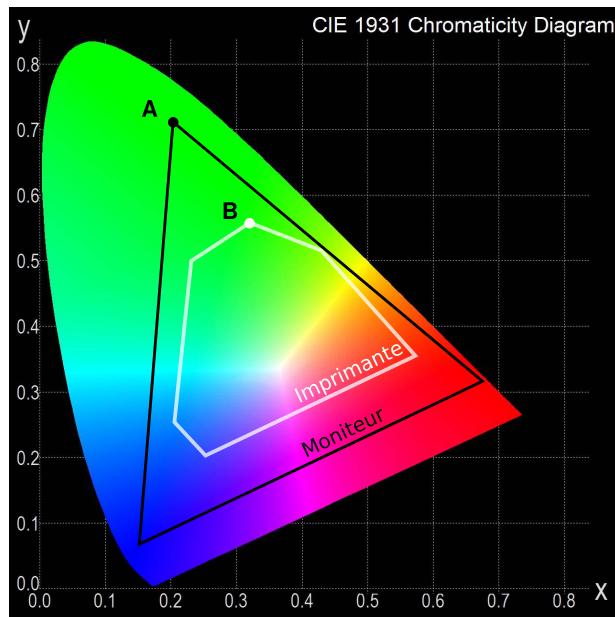


FIGURE 6: Distorsion de couleurs

11. voir http://fr.wikipedia.org/wiki/CIE_xyY

Le point A est le vert le plus pur représentable par le moniteur. Il est donc codé par le triplet RVB (0,255,0) : « du vert et ni rouge ni bleu ». Lorsqu'on envoie à l'imprimante l'ordre « imprime un pixel (0,255,0) », elle produit son meilleur vert, représenté par le point B. En d'autres termes, la couleur affichée n'est pas celle imprimée.

5.4.2 Calibrage

Pour remédier à une distorsion de couleurs, il faut calibrer la chaîne graphique avec une charte comme celle présentée figure 7.

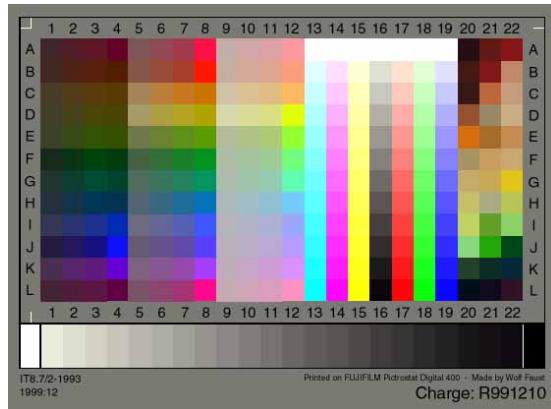


FIGURE 7: exemple de charte de calibration (©Wolf Faust)

À l'aide d'une cellule de calibrage, on compare chaque couleur telle qu'elle est sur la charte, sur l'écran, une fois imprimé, etc. De cette comparaison, on tire des corrections à appliquer sur chaque couleur pour obtenir à l'impression la même distribution colorimétrique qu'à l'écran. Une autre solution est d'utiliser les profils ICC

5.4.3 Profils ICC

Un profil ICC est un fichier décrivant comment passer de l'espace de couleurs du périphérique à un espace de couleurs indépendant. En utilisant le même espace indépendant comme cible pour tous les profils, on maîtrise la couleur. La figure 8 illustre le mécanisme ICC pour un scanner et une imprimante.

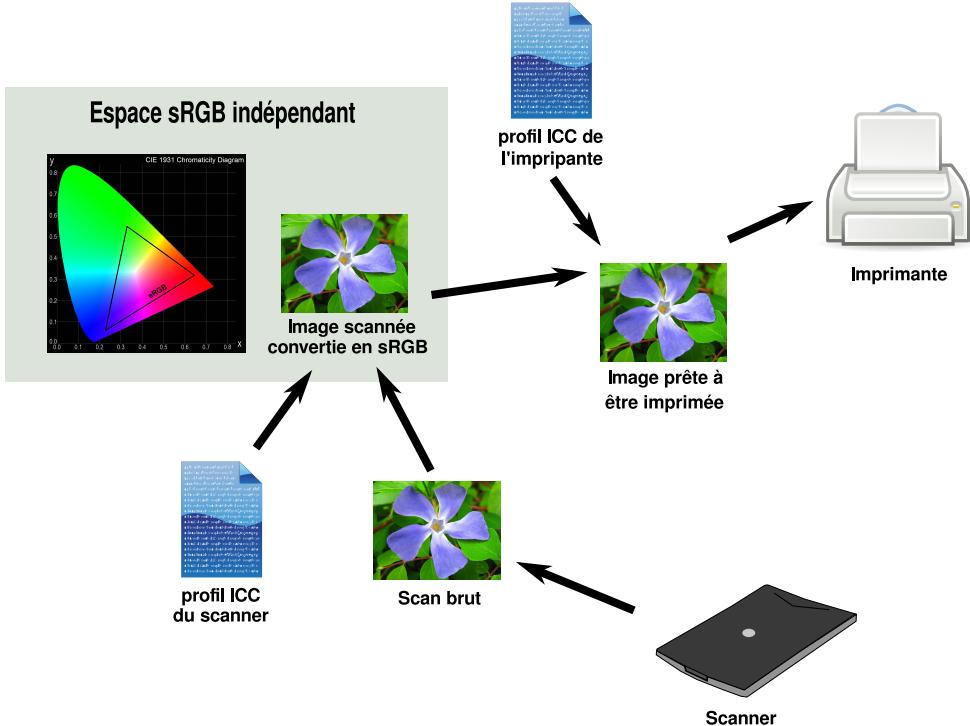


FIGURE 8: Mécanisme des profils ICC

Pour raffiner le traitement, on peut avoir plusieurs espaces de couleurs cibles en fonction des gamuts des appareils.

6 Format d'images

Pour représenter les images sur les mémoires de stockages (disques durs, clés USB, etc), il y a pléthore de formats. Pour des raisons historiques et de verrouillage marketing, chaque industriel ou groupes d'industriels a tenté d'imposer son format de fichier image. Les plus connus sont JPEG, TIFF, PNG, GIF, BMP,... Lequel choisir ?

Certains formats comme le JPEG permettent de compresser les images en éliminant une partie des détails. On parle de compression avec perte ou destructive. Le format PNG présente l'avantage de gérer une compression sans perte. Mais PNG ne supporte pas les animations comme GIF qui lui ne supporte pas plus de 256 couleurs (en palette). En revanche PNG gère la transparence et, cerise sur le gâteau, c'est un format ouvert. Parfaitement documenté et interopérable, PNG est le format qui rassemble le plus d'avantages. Le tableau 1 donne quelques caractéristiques des principaux formats d'images

7 Images vectorielles

Au lieu de mémoriser une mosaïque de pixels, les données de l'image sont décrites géométriquement par des courbes mathématiques paramétrées. Par exemple, un dessin peut être mémorisé par l'ordinateur comme « une droite tracée entre les points (x_1, y_1) et (x_2, y_2) », puis « un cercle tracé de centre (x_3, y_3) et de rayon 30 de couleur rouge ». Le rayon de 30 peut signifier 30 mm

	Compression	Couleurs	Affichage progressif	Animation	Transparence
JPEG	réglable, avec perte	16 millions	Oui	Non	Non
GIF	Oui, sans perte	256 maxi (palette)	Oui	Oui	Oui
PNG	Oui, avec ou sans perte	Palette de 1 à 256 couleurs, ou 16 millions	Oui	Non	Oui(alpha)
TIFF	Oui, avec ou sans perte	1 à 16 millions	Non	Non	Oui

TABLE 1: Formats d’images

ou 30 cm : la taille du fichier est indépendante de la taille de l’image. De plus ce type d’image nécessite peu de mémoire.

Les images vectorielles sont utilisées en DAO et en illustration de type flash. Pour être affichées ou imprimées, on doit les transformer en image matricielle par un procédé dit de rasterisation. Le procédé inverse est la vectorisation qui est utile pour passer d’une photo à un schéma par exemple.

8 Logiciels

Les deux logiciels libres de références pour manipuler les images sont :

1. The Gimp pour les images matricielles
2. Inkscape pour les images vectorielles

Ils sont disponibles en versions GNU/Linux, Mac et Windows. Pour cette dernière plateforme, on les trouve en version portable, c’est à dire ne nécessitant pas d’installation.

<http://framakey.org/Portables/GIMPPortable>

<http://framakey.org/Portables/InkscapePortable>

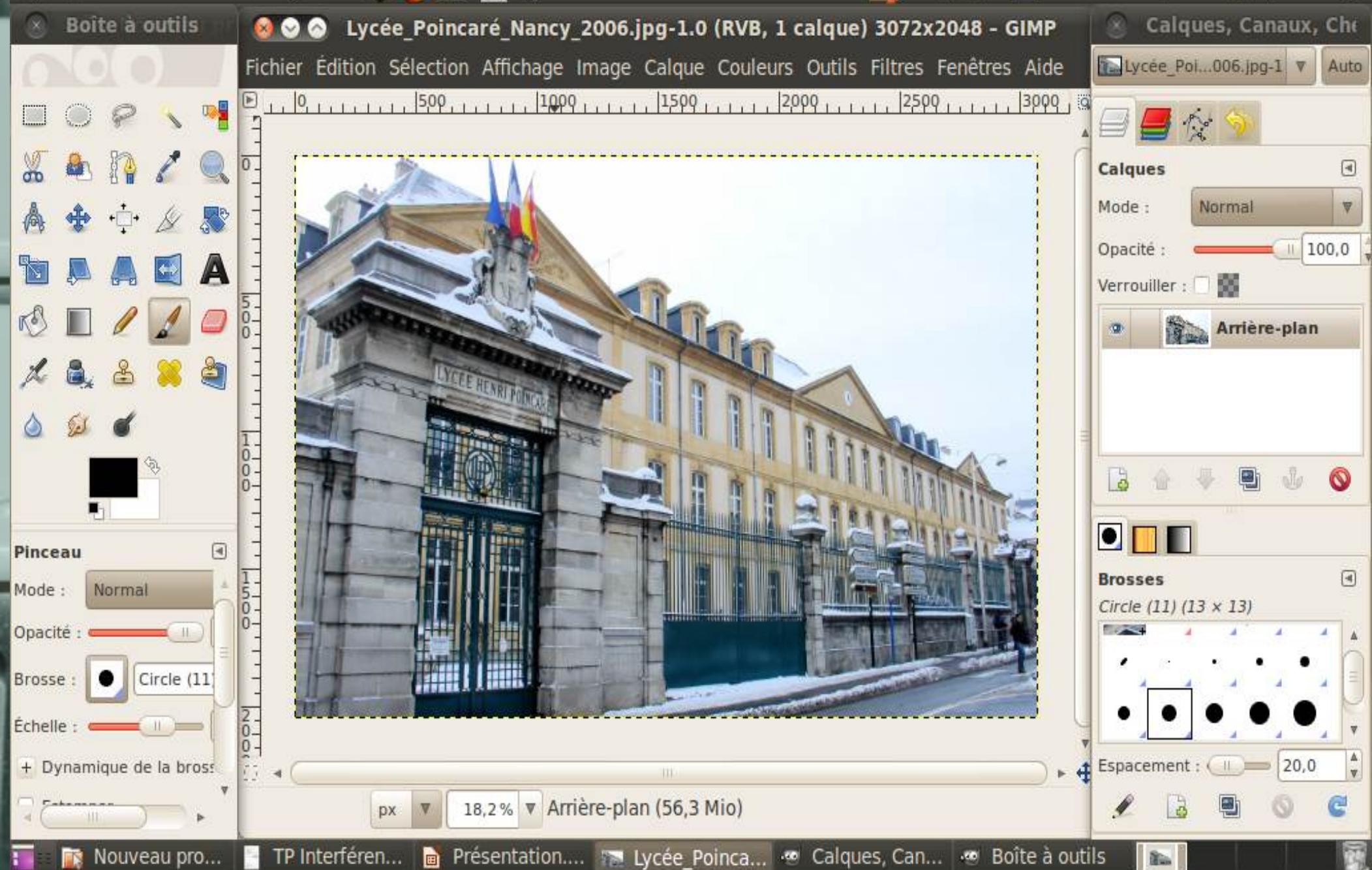
Annexes

Document à venir

Pistes d'exploitation du document :

Une image .png traitée par le logiciel « *The Gimp* »





I) Image en mode point: travail sur la résolution spatiale.

- Dimensions de l'image ? (px, mm, inch...)
- Résolution ? (px/in)
- Nombre de Mégapixels à calculer.

1) Redimensionnement à 33 % du nombre de px puis à 300 %

- Peut-on toujours lire les petites inscriptions ?
- Qu'a t-on perdu dans l'opération ?

2) Enregistrement du fichier avec une qualité de 50 %

- Taille du nouveau fichier ?
- Taille de l'image changée ?
- Comparaison des qualités des inscriptions.

3) Types de fichiers images les plus courants.

4) Avantage du .png

II) Image en mode point: travail sur la résolution colorimétrique.

1) Mode de l'image ?

- Codage ? Calculs du nombre de couleurs disponibles...

2) Changement du mode en 256 couleurs indexées.

- L'image semble t'elle différente ?
- Intérêt de la manipulation ?

III) Images vectorielles.

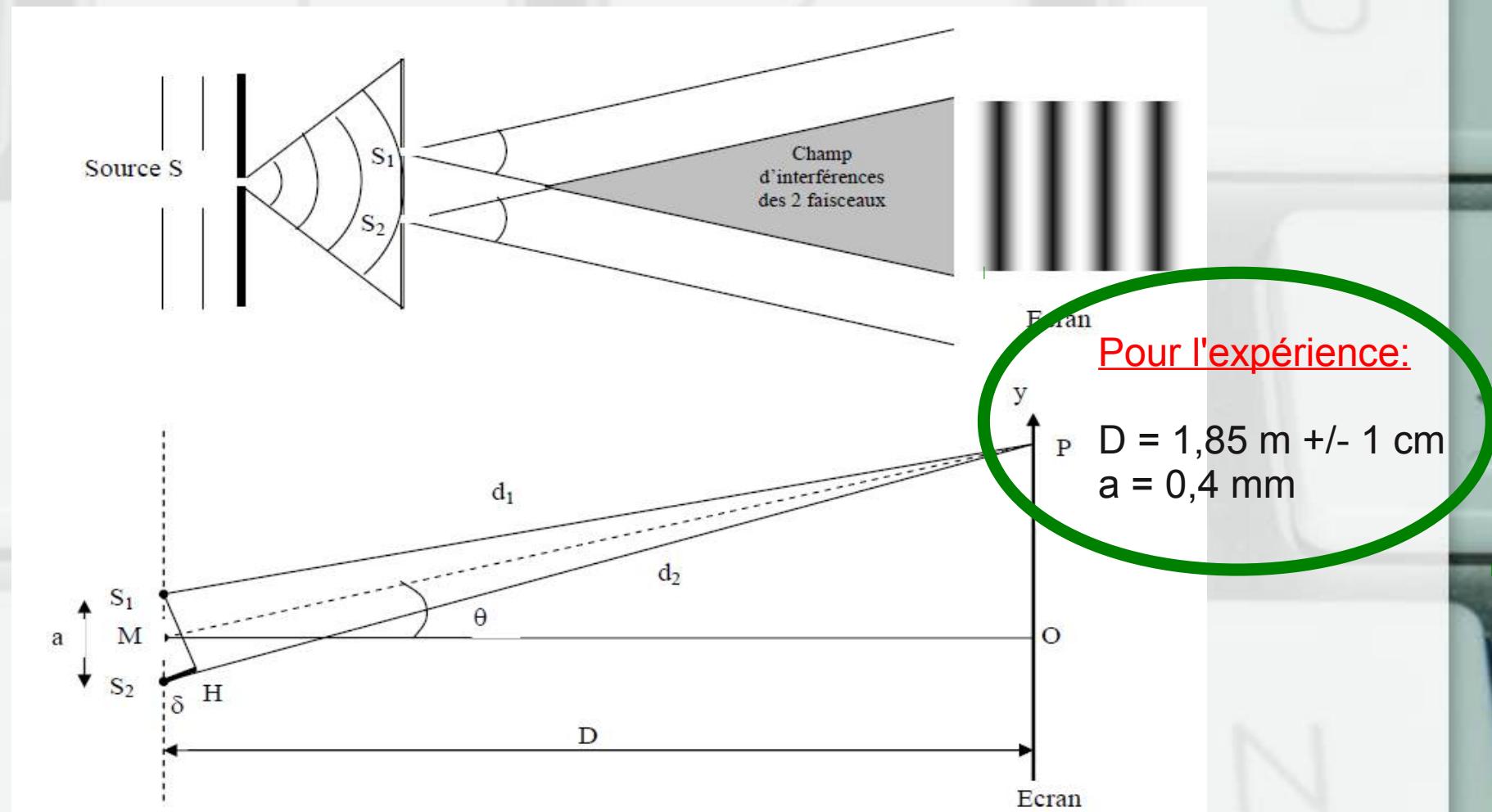
1) Réalisation d'une petite figure avec le logiciel inksckape.

2) Agrandir l'image et créer un nouveau fichier.

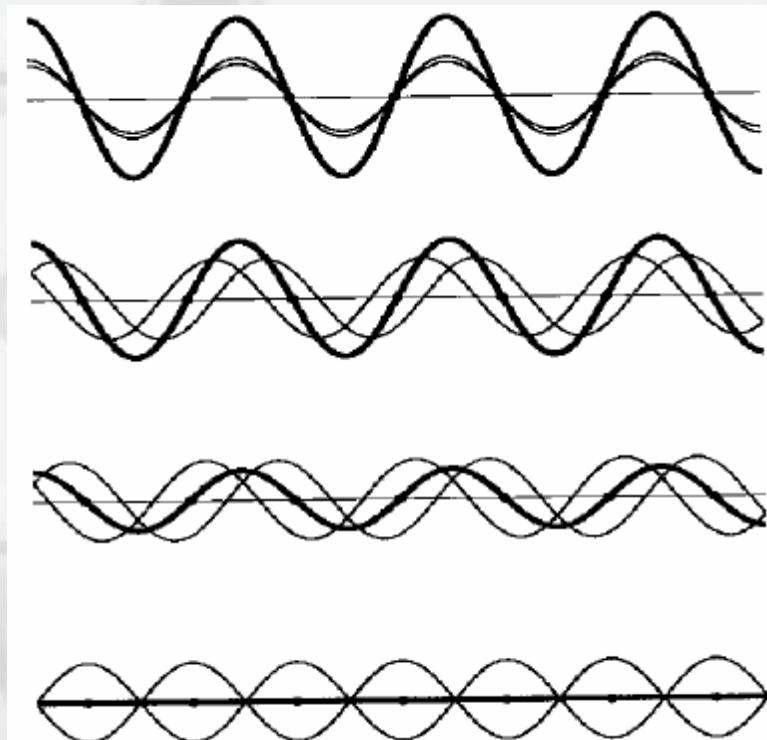
3) Comparaison de la taille des fichiers.

4) Intéret de ce type d'images...

Réalisation d'un montage d'interférence lumineuse: TP fentes Young

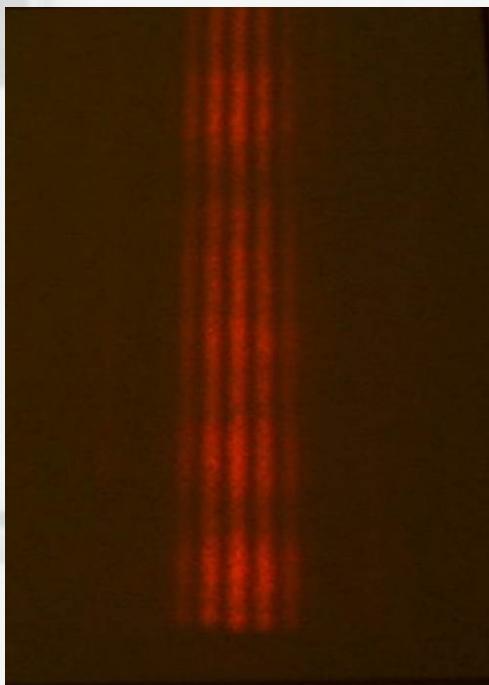


Réinvestissement des connaissances.

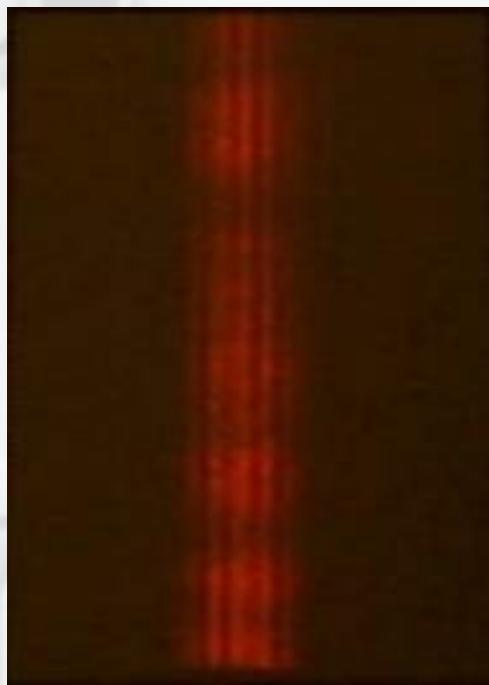


Enregistrement de la même figure d'interférence à l'aide d'une web-cam mais à des distances différentes. On obtient trois fichiers représentant le même phénomène physique mais sous trois résolutions spatiales différentes.

La largeur de chaque cadre est de 5 cm +/- 1 mm.



492 x 726 px

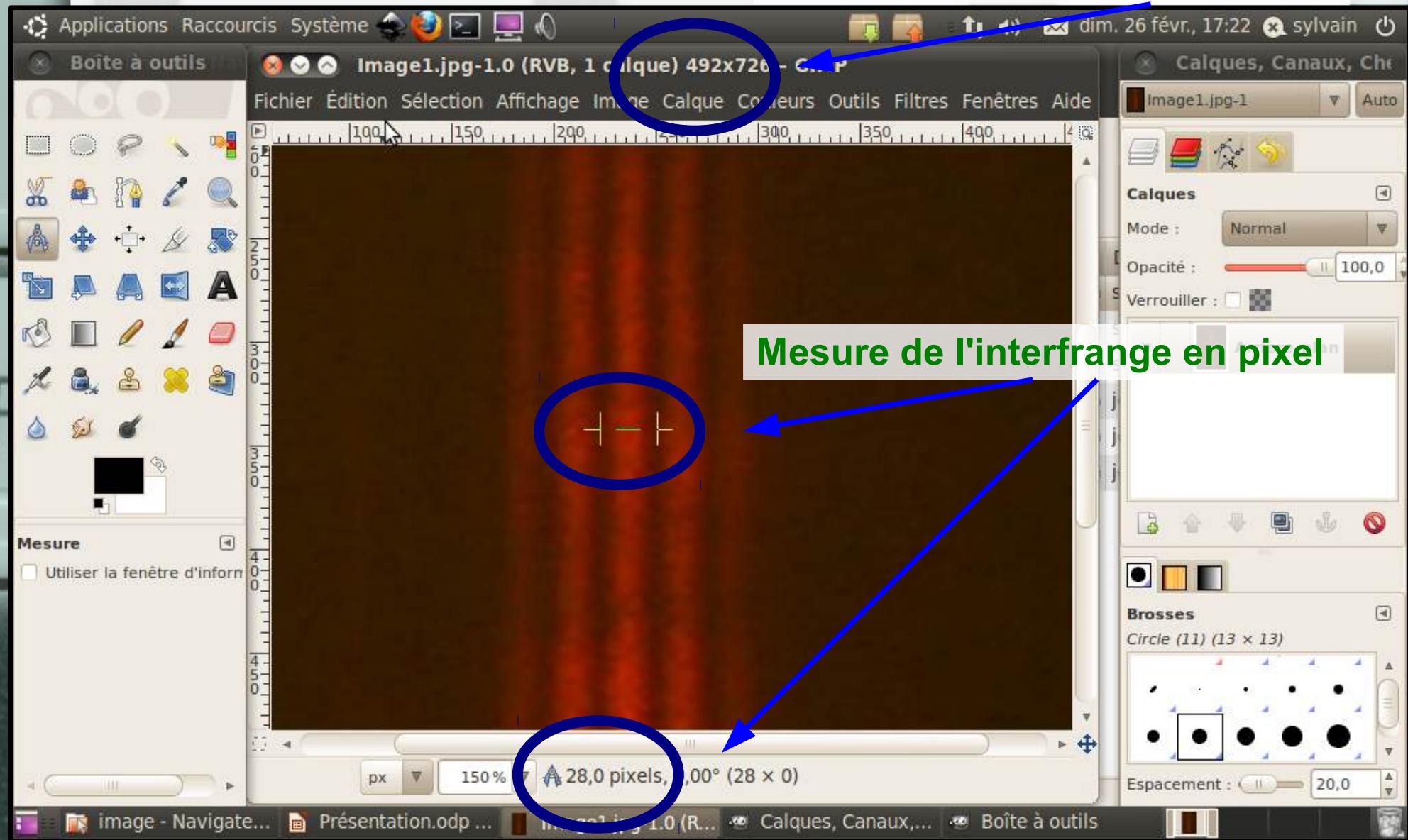


189 x 288 px



125 x 208 px

5 cm sont représentés par 492 pixels



Pistes d'exploitation:

- ▶ Proposition de protocole pour déterminer la longueur d'onde du laser He/Ne.
- ▶ Validation du protocole.
- ▶ Mesure de l'interfrange i à l'aide du logiciel.
- ▶ Estimation de la précision des mesures.
- ▶ Détermination de λ par le calcul:

$$\lambda = (i \times a) / D = ((28 \times 5 / 492) \times 0.04 / 1850 = 615.10^{-6} \text{ cm.}$$

- ▶ Calcul d'erreur. $\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta i}{i} + \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta D}{D}$ et $\frac{\Delta i}{i} = \frac{\Delta p_x}{p_x}$
- ▶ Réflexion autour du nombre de chiffres significatifs.
- ▶ Détermination de λ à partir des deux autres fichiers de qualité moindre.
- ▶ Calculs d'erreur.
- ▶ Comparaison des résultats.
- ▶ Critiques.
- ▶ Propositions d'optimisation de la démarche.
- ▶ Conclusion.

Compétences ciblées:

- ▶ Mobiliser ses connaissances.
- ▶ Présenter les résultats obtenus.
- ▶ Maîtriser les compétences mathématiques de base.
- ▶ Calcul d'erreur.
- ▶ Proposer et réaliser un protocole comprenant des expériences.
- ▶ Confronter des représentations avec la réalité.
- ▶ Porter un jugement critique sur la pertinence des résultats obtenus.
- ▶ Analyser des mesures.
- ▶ Estimer la précision des mesures.
- ▶ Ecrire des résultats de façon adaptée.
- ▶ Mener des expériences assistées par ordinateur.
- ▶ Traiter des mesures.
- ▶ Extraire la valeur scientifique des informations.
- ▶ Identifier les différentes sources d'erreur lors de la mesure.
- ▶ Evaluer et comparer les incertitudes.
- ▶ Maîtriser l'usage des chiffres significatifs.