

Relation spectre-couleur

Il peut être intéressant de pouvoir "deviner", même si c'est très imprécisément, la couleur que donne une lumière de tel ou tel spectre, ou, à l'inverse, de deviner le spectre de la lumière qui provoque telle ou telle couleur.

Le premier cas, "passer" du spectre à la couleur est ce qu'accomplit **la colorimétrie**.

Pour mesurer une couleur, un spectrocolorimètre remonte à la cause (mesure le spectre de la lumière) puis en calcul l'effet (la couleur, exprimée par exemple en valeurs Lab).

L'inverse, "passer" de la couleur au spectre, n'est généralement pas possible et la colorimétrie ne le permet pas. Cela s'explique par le fait qu'une même couleur, ou plus précisément un même stimulus, peut être produite par des lumières différentes (cf. *Lumières métamères dans 05 Système visuel.pdf*, p. 5). Vous ne pouvez pas, par exemple, donner un code Lab et demander quel spectre en est la cause, puisqu'il y en a de multiples possibles.

Les formules mathématiques mises au point par la colorimétrie pour passer du spectre à la couleur ne sont pas simples. Elles modélisent l'action d'un spectre particulier sur les cônes, son ré-encodage par les cellules secondaires et son interprétation final par l'esprit.

Tenter de "deviner" ou de calculer mentalement cette action n'est pas quelque chose d'évident.

Toutefois, pour un domaine restreint, celui des matériaux courants, il est possible de résumer la relation spectre-couleur en **quelques règles simples**.

A la différence des lumières produites par ce qu'on appelle des sources primaires (une matière incandescente, un tube fluorescent, une ampoule Led, un écran, etc.), les lumières produites par des sources secondaires, c'est à dire réfléchies ou transmises* par la plupart des **matériaux courants**, les choses se simplifient en effet beaucoup.

Essentiellement parce que, pour les matériaux courants, le métamérisme est très réduit. Autrement dit, le spectre de la lumière réfléchi par une matière de couleur X est quasi identique au spectre de la lumière réfléchi par toutes les autres matières de couleur X.

Ce qui, en plus de simplifier le problème, transforme la relation spectre-couleur en une relation biunivoque ($\leftrightarrow$) permettant aussi bien de passer du spectre à la couleur que l'inverse.

* dans le cas d'un matériau transparent.

Pour caractériser un matériau, plutôt que de parler du spectre de la lumière réfléchi par ce matériau (spectre qui dépend en fait autant du matériau que du spectre de l'éclairage), on considère son spectre de réflexion.

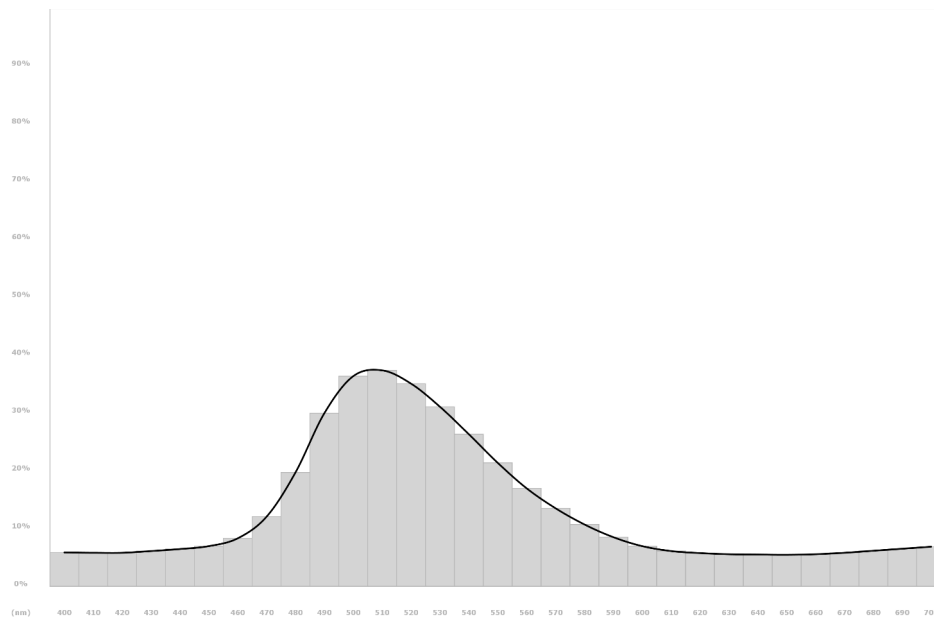
Spectre de réflexion :

Un spectre de réflexion (représenté par une *courbe de réflexion spectrale*), donne, pour chaque longueur d'onde, le pourcentage de la lumière incidente qui est réfléchi par un matériau.

Par rapport à une courbe spectrale, seule change l'unité de l'axe des ordonnées. Elle n'est pas donnée en Watt, mais en %.

Un spectre de réflexion caractérise donc un matériau et non pas une lumière.

Courbe de réflexion d'un échantillon vert vif :



Au cours, vous avez relié intuitivement une série d'échantillons peints à leur courbe de réflexion spectrale*, dégageant ainsi les quelques règles simples de cette relation spectre/couleur.

* Ces courbes de réflexion spectrales ont été obtenues grâce à un spectrocolorimètre ("hacké" pour qu'il donne la courbe spectrale plutôt que le code Lab qu'il calcule à partir de celle-ci. C'est à dire "hacké" pour le transformer en spectromètre.) Dans le cas de la mesure d'un matériau, un spectromètre éclaire celui-ci avec une lumière de spectre complet et connu, puis décompose avec un réseau ou un prisme la lumière réfléchi et mesure la quantité de lumière réfléchi pour chaque longueur d'onde.

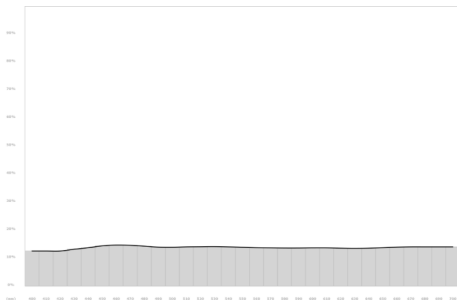
Couleurs achromatiques

Lorsque l'échantillon réfléchit toutes les longueurs d'onde dans les mêmes proportions ("si sa courbe est plate"), sa couleur est achromatique.

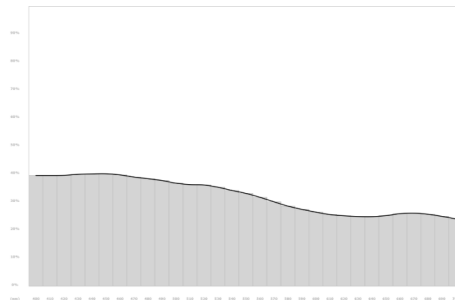
Plus il réfléchit de lumière ("plus sa courbe est haute") plus il est clair.

Un déséquilibre dans les quantités de lumière réfléchie pour chaque longueur d'onde en fait donc un chromatique.

Gris assez foncé :



Gris plus clair que le précédent et **bleuté** :



Teinte

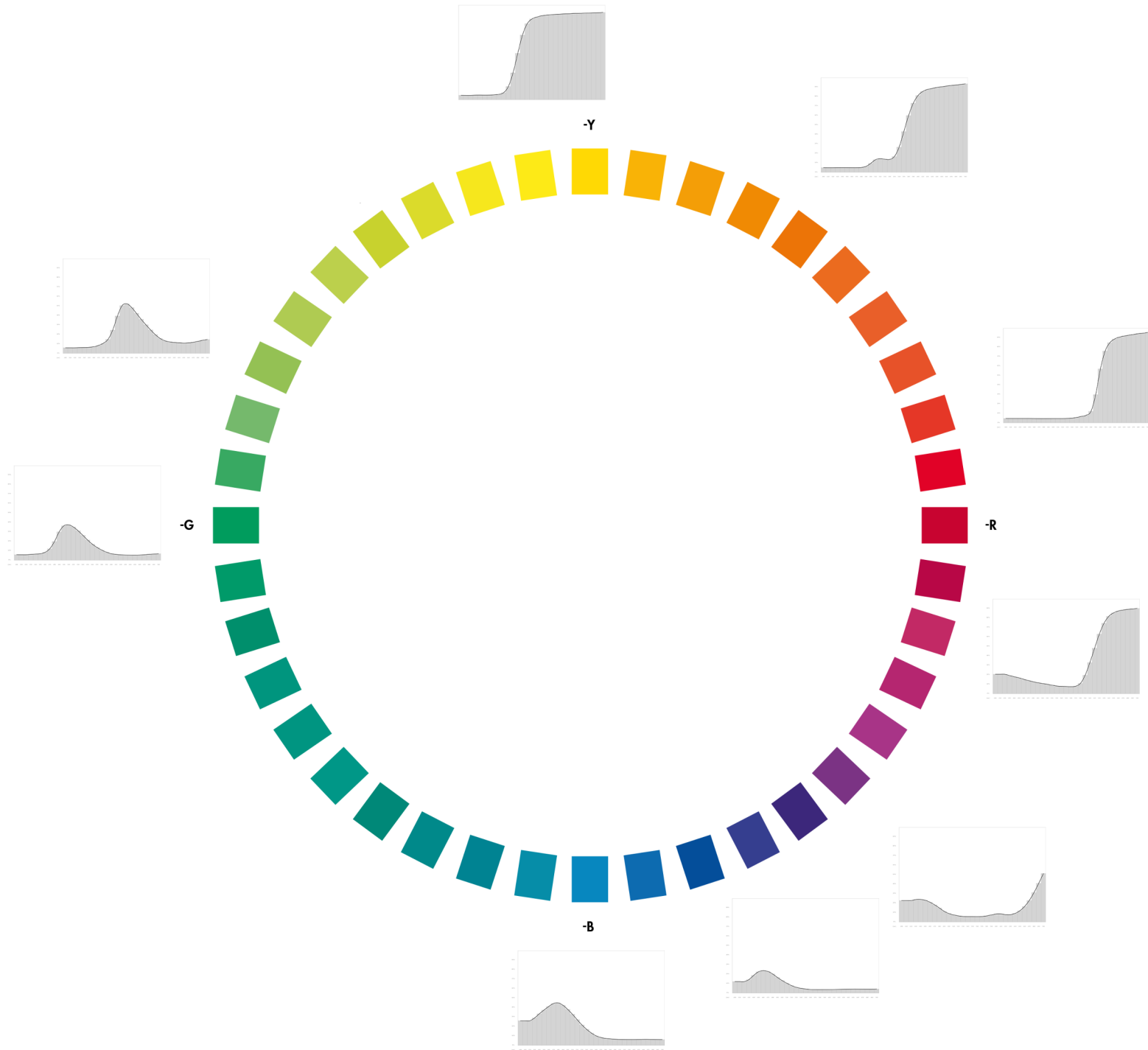
La teinte est donnée par les longueurs d'onde les plus réfléchies.

La zone des longueurs d'onde les plus réfléchies peut être plus ou moins large selon les teintes ; elle peut être simple ou double ; et dans le cas d'une zone double intervient aussi le rapport de pourcentage de réflexion entre les deux zones.

En résumé, la teinte est donnée par "l'endroit et l'étendue de la (ou des deux) bosse(s) que forme la courbe".

Dans le schéma de la page suivante, organisé autour du cercle chromatique NCS, on voit que :

- Les **jaunes** réfléchissent 2/3 du spectre (les moyennes et les longues longueurs d'onde) et cette zone, en passant par les **oranges**, va en se rétrécissant jusqu'à 1/3 du spectre (dans les longues longueurs d'onde) pour les **rouges**.
- Des **rouge-bleu** au **violet**, les deux extrémités du spectre (les courtes et les longues longueurs d'onde) sont réfléchies, dans des proportions différentes suivant la teinte, plus de longues pour les rouge-bleu, plus de courtes pour les bleu-rouge.
- Mais au-delà, des **bleu-rouge** aux **jaune-vert** en passant par les **verts**, seul environ 1/3 du spectre est réfléchi (avec un déplacement progressif des courtes aux moyennes longueurs d'onde). On observe peut-être un élargissement de la zone pour les bleus, bleu-vert.



Couleurs vives

Tous les échantillons dont la courbe de réflexion est reprise sur le schéma précédent sont relativement vifs.

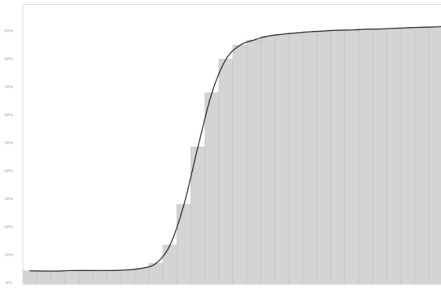
Il serait simple de pouvoir dire que, pour les couleurs vives, les longueurs d'onde les plus réfléchies le sont à 100 % et les moins réfléchies le sont à 0 %. (Que le spectre est le plus *déséquilibré* possible.)

Mais les moins réfléchies le sont toujours un peu (entre 5 et 15%) et, surtout, il n'y a que pour les matériaux jaunes, oranges et rouges, ainsi que pour les grandes longueurs d'onde du magenta, que les plus réfléchies le sont à 100 % (ou presque : 90 % en fait). Pour les autres teintes, les longueurs d'onde les plus réfléchies plafonnent à 55 %. Elles ne sont même réfléchies qu'à 25 % pour le bleu-rouge.

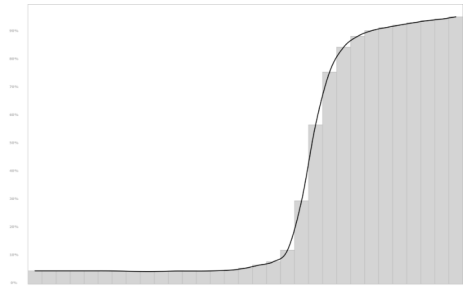
Disons donc qu'un matériau est vif lorsque la différence de pourcentage de réflexion entre les longueurs d'onde les plus réfléchies et les moins réfléchies est la plus grande.

C'est à dire lorsque les longueurs d'onde les plus réfléchies le sont au maximum et que les longueurs d'onde les moins réfléchies le sont au minimum. Le pourcentage maximum de réflexion variant toutefois avec la teinte.

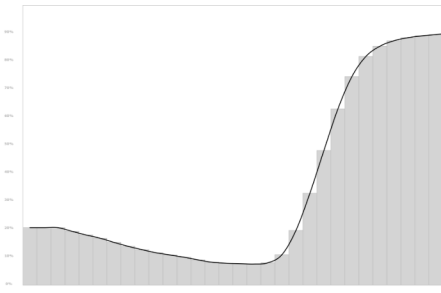
Jaune vif :



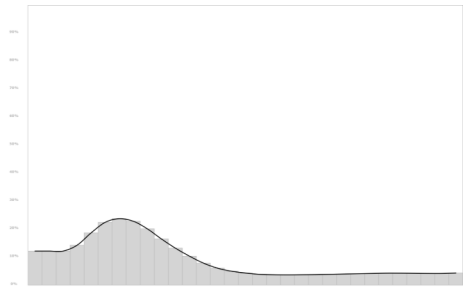
Rouge vif :



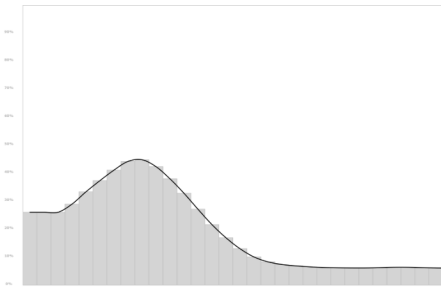
Magenta vif :



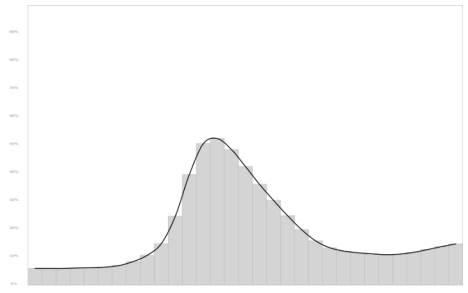
Bleu rouge assez vif :



Bleu vif :



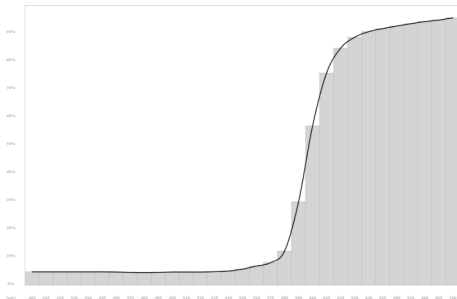
Vert-jaune vif :



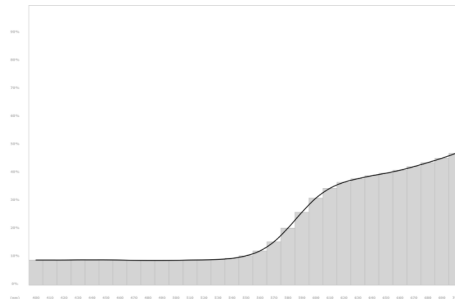
Noirceur

Lorsque les longueurs d'onde les plus réfléchies ne le sont pas au maximum, une noirceur apparaît dans le matériau.
Et évidemment, plus le pourcentage de réflexion des longueurs d'onde les plus réfléchies diminue, plus le matériau est noirâtre.

Rouge vif :



Rouge-noir :



Ce qu'on pourrait écrire comme suit :
 $\text{noirceur} = \% \text{ réflexion maximale} - \% \text{ des plus réfléchies}$

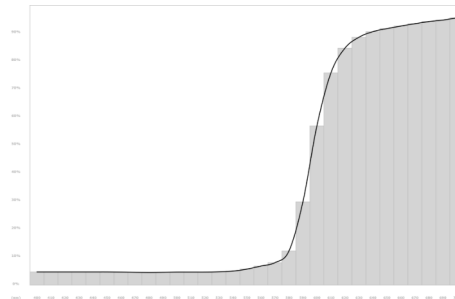
ou, en faisant la simplification d'assimiler le pourcentage de réflexion maximale à 100 % de réflexion (cf. discussion page précédente)

noirceur = 100 - % des plus réfléchies

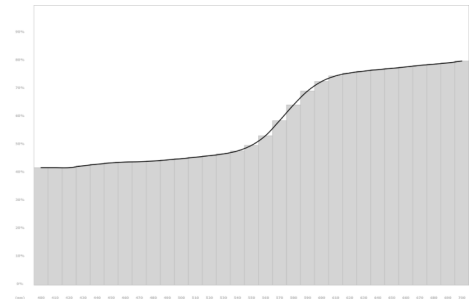
Blancheur

Lorsque les longueurs d'onde les moins réfléchies le sont plus que le minimum, une blancheur apparaît dans le matériau.
Et évidemment, plus le pourcentage de réflexion des longueurs d'onde les moins réfléchies augmente, plus le matériau est blanchâtre.

Rouge vif :



Rouge-blanc :



Remarquez que le rouge-blanc de l'exemple doit aussi être un peu noirâtre, puisque les longueurs d'onde les plus réfléchies ne le sont pas au maximum.

Donc :

blancheur = % des moins réfléchies

Précision : Il est entendu que lors de ces variations, il ne se crée pas de déséquilibres, ni parmi les pourcentages de réflexion des longueurs d'onde les moins réfléchies, ni parmi les pourcentages de réflexion des longueurs d'onde les plus réfléchies. Dans le cas contraire, en plus d'une modification de la blancheur et/ou de la noirceur, cela générerait une modification de la teinte.

Chroma, noirceur, blancheur

Le chroma est aussi assez facilement déductible des courbes de réflexion.

Comme le **chroma** décrit "la quantité de la partie chromatique d'une couleur", il dépend donc à contrario à la fois de la blancheur et de la noirceur.

$$\text{Partie chromatique} = 100 - \text{noirceur} - \text{blancheur}$$

Le chroma dépend donc à la fois du pourcentage de réflexion des longueurs d'onde les plus réfléchies et du pourcentage de réflexion des longueurs d'onde les moins réfléchies.

$$\text{Chroma} = 100 - (100 - \% \text{ des plus réfléchies}) - \% \text{ des moins réfléchies}$$

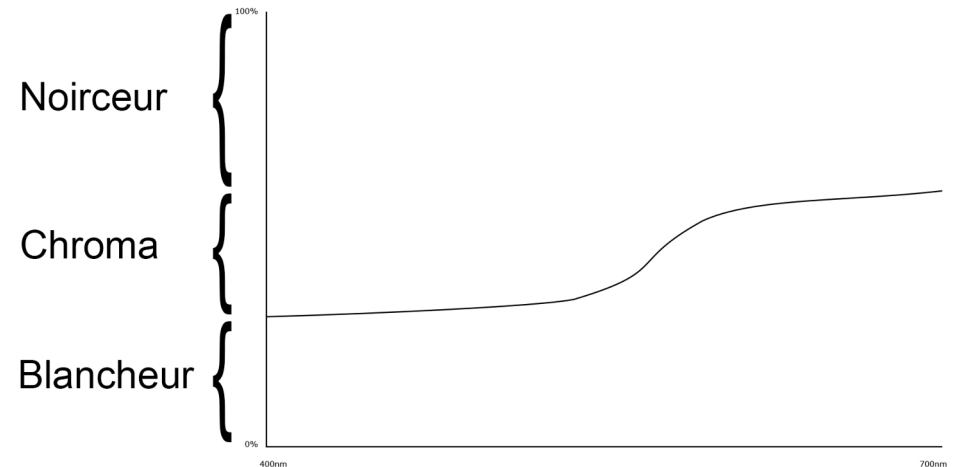
Donc :

$$\text{Chroma} = \% \text{ des plus réfléchies} - \% \text{ des moins réfléchies}$$

Le chroma est dû à la différence entre le pourcentage de réflexion des longueurs d'onde les plus réfléchies et le pourcentage de réflexion des longueurs d'onde les moins réfléchies.

Plus cette différence est grande, plus le chroma est élevé. Tout en tenant compte du maximum de réflexion rencontré pour la teinte considérée...

Donc **en résumé** :



Dans cet exemple, avec toutes les approximations et les simplifications que nous avons faites, la couleur du matériau a une noirceur d'environ 40 %, une blancheur d'environ 30 %, et un chroma d'environ 30 %.

Le total des trois donnant 100 %, rencontrant par là le principe à la base des "camemberts" du premier exercice ou du système NCS.

Clarté

La clarté est beaucoup moins facilement déductible des courbes de réflexion. Ici, tout se complique :

La clarté dépend à la fois de la quantité de lumière réfléchie (ce qui, graphiquement, se traduit par l'aire sous la courbe) et à la fois des longueurs d'onde qui la composent.

En effet, toutes les longueurs d'onde "ne pèsent pas du même poids" dans la clarté* (les longueurs d'onde courtes par exemple ne "génèrent" que très peu de clarté). Ce qui rend le "calcul" assez délicat.

* C'est ce qu'exprime la fonction d'[*Efficacité lumineuse spectrale*](#), dont la courbe en cloche présente un maximum vers 683nm.

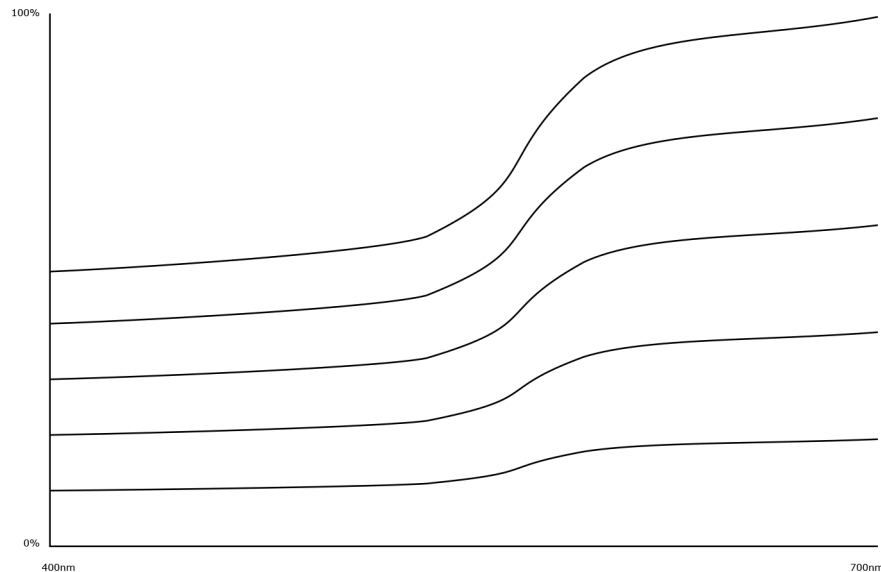
Une autre relation spectre/couleur :

On pourrait aussi s'intéresser à ce qu'ont en commun des couleurs qui sont dues à des spectres présentant un même rapport entre les pourcentages de réflexion des différentes longueurs d'onde et ne se différenciant l'un de l'autre que par la quantité de lumière réfléchie.

Ou, pour le dire plus simplement, s'intéresser à ce qu'ont en commun des couleurs qui sont dues à des spectres de réflexion qui ont une "même" courbe plus ou moins étirée.

Ou, pour le dire encore autrement, **des matières qui réfléchissent une "même" lumière mais plus ou moins "forte"**.

Par exemple, qu'ont en commun, visuellement, les couleurs qui seraient dues aux cinq spectres de réflexion ci-dessous ?



Ces 5 couleurs n'ont **pas la même noirceur**.

Puisque plus le pourcentage de réflexion des longueurs d'onde les plus réfléchies diminue, plus le matériau est noirâtre.

Les 5 couleurs ont **la même teinte**.

Puisque la teinte est donnée par les longueurs d'onde les plus réfléchies.

Les 5 couleurs ont aussi **la même saturation**.

voici donc un "nouveau" mot, une nouvelle caractéristique de la couleur.

Une caractéristique à la fois proche du chroma -en ceci qu'elle indique l'importance de la partie chromatique d'une couleur- mais différente du chroma -en ceci qu'elle indique l'importance de la partie chromatique relativement non pas au blanc et au noir mais juste relativement au blanc.

Saturation :

Caractéristique d'une couleur qui correspond à la question : dans quelle proportion est-ce que j'y vois des couleurs élémentaires chromatiques relativement au blanc.

Le chroma indique l'importance de la partie chromatique relativement à la couleur en entier, ce qu'on pourrait écrire comme suit :

Chroma = Partie chromatique / Couleur

ou

Chroma = Partie chromatique / (Partie chromatique + **blanc** + **noir**)

La saturation, elle, indique l'importance de la partie chromatique relativement à la couleur non plus en entier mais abstraction faite du noir, ce qu'on pourrait écrire comme suit :

Saturation = Partie chromatique / (Couleur - noir)

ou

Saturation = Partie chromatique / (Partie chromatique + **blanc**)

La saturation est due à la **différence** entre le pourcentage de réflexion des longueurs d'onde les plus réfléchies et le pourcentage de réflexion des longueurs d'onde les moins réfléchies **relativement** au pourcentage des longueurs d'onde les plus réfléchies.

Ce qu'on pourrait écrire comme suit :

$(\% \text{ des plus réfléchies} - \% \text{ des moins réfléchies}) / \% \text{ des plus réfléchies}$

Plus cette différence relative est grande, plus la saturation est élevée.

Pour les cinq courbes de réflexion de notre exemple, cette différence relative est la même.

(Pour chaque courbe, le pourcentage de réflexion des longueurs d'onde les plus réfléchies est à peu près deux fois plus grand que celui des longueurs d'onde les moins réfléchies, donc la différence relative est à chaque fois de 0,5* ; ce qu'on peut aussi exprimer par 50 sur une échelle de 100)

La saturation est maximum (100) (différence relative = 1) lorsque les longueurs d'onde les moins réfléchies ne le sont pas du tout.

La saturation est minimum (0) (différence relative = 0) lorsque les longueurs d'onde les plus et moins réfléchies le sont au même pourcentage (lorsque la courbe est "plate" et donc la couleur achromatique).

* en reprenant la formule

$(\% \text{ des plus réfléchies} - \% \text{ des moins réfléchies}) / \% \text{ des plus réfléchies}$

et en arrondissant un peu les valeurs, ça donne :

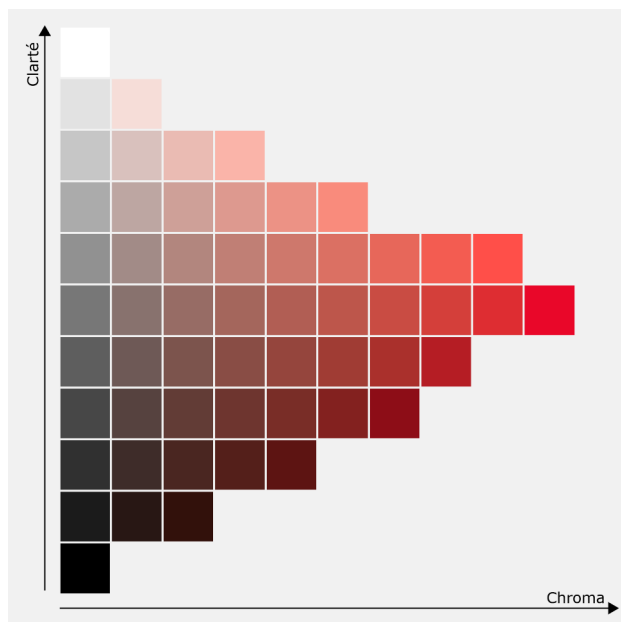
$(100 - 50) / 100 = 0,5$

$(80 - 40) / 80 = 0,5$

$(60 - 30) / 60 = 0,5$

etc.

Le schéma de la page suivante reprend l'organisation d'une page d'atlas Munsell ou Ral Design* où toutes les couleurs ont la même teinte (rouge dans ce cas-ci) et sont organisées par clarté et chroma comme dans l'image ci-dessous.



* il s'agit ici en vrai d'une représentation limitée aux couleurs-écran standard d'un plan vertical dans l'espace Lab, ce qui est équivalent.

Le schéma de la page suivante "superpose" à cette page d'atlas toute une série d'informations :

Vous trouvez des **lignes obliques** qui ont le noir pour origine : Le long de chacune de ces lignes se situent des couleurs dues à **des matières qui réfléchissent une "même" lumière mais plus ou moins "forte"**.

Trois de ces lignes sont dessinées. Sur chacune de ces trois lignes, vous trouvez 5 couleurs représentées par leur "**camembert**" (leur graphe sectoriel, comprenant une partie chromatique -rouge ici-, une partie noire, une partie blanche).

Chaque couleur est aussi accompagnée du **spectre de réflexion** auquel elle est due.

En observant le schéma, faites les liens spectre/camembert.

Noirceur :

La noirceur augmente le long de chacune de ces lignes (vers le noir évidemment).

Alors qu'à l'inverse le spectre de réflexion s'étire dans la direction opposée (le matériaux réfléchit une lumière de plus en plus forte, ce que signifie la flèche au bout de ces lignes).

Saturation :

Une des trois lignes correspond à des couleurs de **saturation 100** : le camembert de ces couleurs ne montre pas de partie blanche. Abstraction faite du noir, ces couleurs ne sont "que" chromatiques.

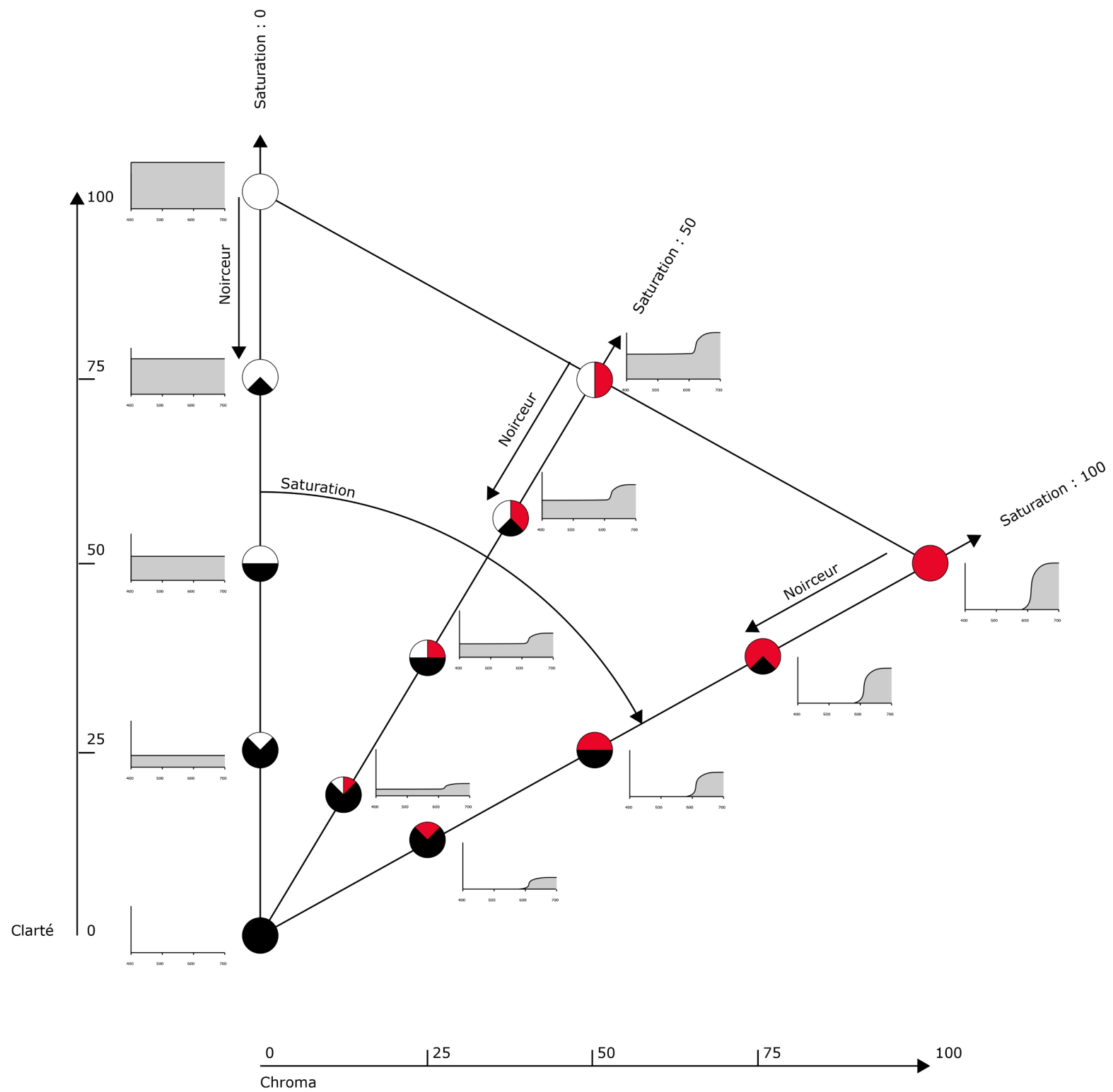
Une des trois lignes correspond à des couleurs de **saturation 50** : le camembert de ces couleurs montre à chaque fois une partie chromatique égale à la partie blanche. Abstraction faite du noir et donc relativement à la partie blanche, ces couleurs sont chromatiques "à 50 %".

Une des trois lignes correspond à des couleurs de **saturation 0** : la ligne verticale des achromatiques.

Le schéma se permet évidemment beaucoup de simplifications ou d'idéalisations par rapport à la réalité des phénomènes.

Les spectres de réflexion montrent des minima à 0 % et des maxima à 100 %, ce qui n'est jamais le cas et ce qui serait encore plus éloigné de la réalité pour d'autres teintes que les rouges, les orangés et les jaunes.

Mais surtout, la liaison physique/perception y est grandement simplifiée : Par exemple, un gris de clarté moyenne (moitié blanc, moitié noir), n'est pas dû en réalité à une réflexion de 50 %, mais à une réflexion de 18% ou 19%.



Sur le schéma précédant, les coordonnées cartésiennes étaient attribuées au chroma et à la clarté.

La **saturation** s'exprimait alors par l'**angle** qu'une ligne de même saturation faisait avec l'axe des achromatiques.

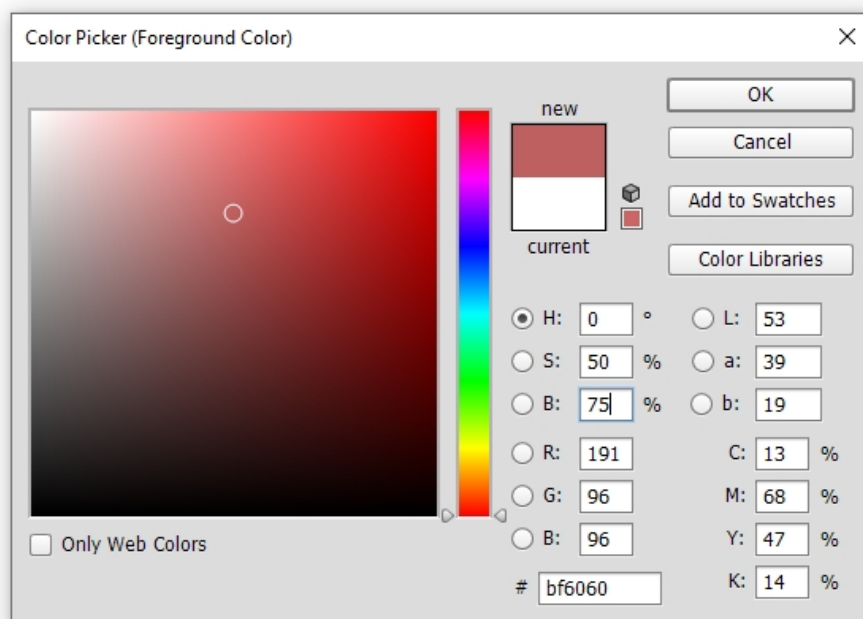
La **noirceur**, elle, augmentait le long de ces **lignes obliques**.

Un espace que vous utilisez sans doute souvent -l'espace que les logiciels Adobe appellent TSL (ou HSB en anglais)- utilise, lui, la saturation et la noirceur comme coordonnées cartésiennes.

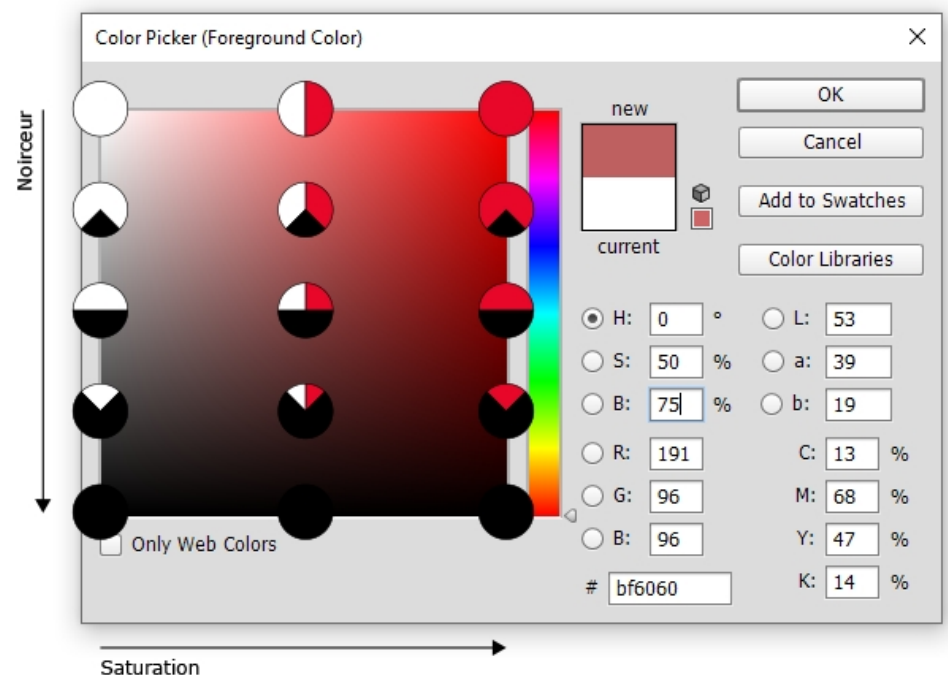
L'axe horizontal du carré correspond à la **saturation (S)**.

L'axe vertical du carré, dénommé "Luminosité (L)" ou en anglais "Brightness" (B) correspond plus vraisemblablement à la **noirceur**. Même si cette dernière se retrouve "codée à l'envers" : L=100 signifiant noirceur de 0 et inversement.

La couleur de l'exemple a donc une saturation de 50 et une noirceur de 25 (L=75).



En cochant le bouton radio **T** (Teinte) ou en anglais H (Hue) dans le sélecteur de couleur de Photoshop, le grand carré de couleur vous montre toutes les couleurs d'une même teinte (rouge encore pour l'exemple - 0° dans TSL).



Remarquez que les lignes obliques du schéma précédent deviennent des lignes verticales, avec l'inconvénient d'une "démultipliation" du noir.

L'espace TSL est une présentation perceptive du code RVB.

En quelques formules mathématiques simples on passe d'une codification physique (un mélange de trois lumières, le code RVB) à une codification perceptive, visuelle (le code TSL).

Ces formules mathématiques étant l'équivalent des règles simples permettant de passer du spectre à la couleur, règles dont traitait cette partie du cours.