

La reproduction des couleurs

Par l'expression « reproduction des couleurs » on entend un processus qui se déroule en deux étapes.

La première étape consiste à capter des couleurs "existantes". La deuxième étape consiste à re-créeer ces couleurs.

La première étape est appelée l'**analyse**, la deuxième est appelée la **synthèse**.

Par exemple, l'appareil photo de votre smartphone *analyse* les couleurs de la scène. L'écran de votre smartphone les *synthétise*.

Tant la synthèse que l'analyse repose sur un nombre réduit de couleurs, généralement trois, qui sont appelées **couleurs primaires**.

Pour l'appareil photo et aussi pour l'écran de votre smartphone il s'agit d'un certain rouge, d'un certain vert, d'un certain bleu. Ces primaires sont appelées rouge, vert et bleu dans ce contexte technique, bien qu'elles n'aient pas une teinte strictement élémentaire (le vert par exemple est assez jaune).

Par extension, le seul fait d'utiliser des couleurs primaires pour en produire d'autres est aussi parfois qualifier de reproduction des couleurs.

L'écran de votre smartphone peut évidemment afficher des couleurs qui ne proviennent pas d'une photographie. On parlera quand même de synthèse (même si il n'est pas question d'analyse préalable).

Il y a plusieurs manières de combiner, de mélanger, des couleurs primaires pour en produire d'autres.

On distingue deux grands types de synthèse : la **synthèse additive** et la **synthèse soustractive**. Mais des "sous-types" viennent aussi complexifier cette répartition en deux types principaux.

L'écran de votre smartphone réalise une synthèse additive. Ou plus précisément une synthèse additive du (sous-)type *optique partitive*.

Historiquement, les différentes pièces du puzzle se sont mise en place lentement. La compréhension de tous les aspects du problème ne se fait réellement qu'au 19^e S et sa réalisation dans différents contextes techniques de reproduction automatisée, normalisée, n'aura lieu qu'au 20^e S.

Couleurs primaires

Le concept des couleurs primaires (et donc, évidemment celui de synthèse) est le premier à apparaître.

Des textes datant du 17^e S mentionnent déjà le fait que les peintres sont capables de produire par mélange toutes les couleurs avec une palette réduite aux cinq couleurs suivantes : blanc, noir, **bleu**, **rouge** et **jaune**.

Dans son traité *Experiments and considerations touching colours* datant de 1664, Robert Boyle propose de les appeler couleurs *simples* ou *primaires*.

Robert Boyle y mentionne déjà le fait que, par le seul emploi de ces couleurs primaires, « les peintres peuvent imiter les teintes (mais pas toujours la splendeur) de ces presque innombrables couleurs différentes que l'on rencontre dans les œuvres de la nature et de l'art ».

Remarquez qu'il anticipe déjà le problème du gamut, c'est à dire de la gamme des couleurs reproductibles pour telle ou telle technique de reproduction. Il observe que la « splendeur » (le chroma?) des couleurs n'est pas toujours atteignable par le mélange des primaires. Ce n'est pas pour rien que Robert Boyle est célèbre pour avoir, dans la recherche scientifique, mis l'accent sur l'expérience et l'observation (plutôt que sur des théories préexistantes).

Il est compliqué de savoir si les peintres se limitaient parfois à ces cinq couleurs ou si cette connaissance n'était que très marginale par rapport à leur pratique.

Sans le contexte d'une reproduction mécanisée, se limiter à trois couleurs (ou même à cinq) n'a que peu d'avantages.

Comment expliquer dès lors cet intérêt précoce pour les couleurs primaires ?

John Gage, dans son livre *Couleur et Culture*^{*}, propose la piste esthétique d'une recherche de la simplicité voire de l'austérité dans la réduction de la palette. Cette recherche démarrerait avec ce que raconte Pline dans son *Histoire Naturelle* au sujet des quatre couleurs qu'auraient uniquement employées les peintres antiques et notamment le plus célèbre, Apelle (4^e S av. J.-C.).

La palette décrite par Pline comprend le « blanc de Milo, l'ocre d'Attique, le sinope rouge du Pont et l'atramentum noir »^{**}. Le récit de Pline et la réputation d'Apelle (dont on n'a conservé aucune peinture) perdureront durant le moyen âge et nourriront des débats nombreux à la renaissance. La question de la Palette d'Apelle est étymologiquement complexe. Au 16^e S par exemple, la deuxième couleur donnée par Pline, *Sil* en Latin, donnera lieu à de nombreuses controverses, certains voulant y voir du jaune et/ou du bleu. Du bleu que d'autres imagineront pouvoir provenir du mélange ou de la superposition de l'atramentum et du blanc...

Finalement, « [...] au cours des XVIII^e et XIX^e siècles, à mesure que la conception des primaires en rouge-jaune-bleu devenait l'orthodoxie des théoriciens de l'art, l'histoire de Pline finit par être interprétée uniquement en ces termes. »^{***}

* John Gage, *Couleur et Culture*, Thames & Hudson, 2008

** cité par Gage, idem, p. 29

*** idem, p. 36



008 Une autre piste, également proposée par John Gage, où il est encore question d'ensemble de quatre couleurs, est celle des équivalences formes-couleurs ou éléments-couleurs ou saisons-couleurs, ...

Ci-contre une gravure du 16^e S représentant Apelle contemplant quatre formes géométriques, équivalents graphiques des quatre couleurs de sa palette (?), ...

Nicoletto da Modena, Apelle, v. 1507-1515, gravure

Une explication sans doute encore plus délicate à prouver mais tout aussi -sinon plus- vraisemblable est à chercher du côté des couleurs élémentaires :

Il est très probable, si l'on admet notre "logique des couleurs", que celle-ci tend à s'incarner dans des concepts proches. L'intuition des couleurs élémentaires (servant à décrire toutes les couleurs d'une manière "abstraite", perceptive) aurait pris la forme détournée des couleurs primaires (servant à reproduire par mélange toutes les autres d'une manière concrète). Traiter de la couleur d'un point de vue purement perceptif est en effet une manière de penser qui débute seulement timidement à la fin du moyen âge, du moins dans la littérature "technique".

De ce point de vue, on peut dire que De Vinci en avait une meilleure intuition puisqu'il cite six couleurs simples (blanc, jaune, vert, rouge, bleu et noir) dans un chapitre intitulé « Des couleurs qui seront produites par le mélange des autres couleurs, lesquelles se nomment la seconde espèce »^{*}.

Quoiqu'il en soit, le succès théorique de cette triade de primaires **bleu, rouge et jaune** va aller grandissant aux 18^e S et 19^e S.

* Léonard de Vinci, *Traité de la peinture* (Péladan), Paris, 1910, chap. CLXI, p. 50

La distinction additif / Soustractif

Dans l'introduction d'un petit livre publié en 1725, J. C. Le Blon*, en résumant les connaissances de l'époque, trace les grandes lignes de la distinction entre les deux types de mélange, entre les deux type de synthèse.

Le Blon y distingue le "**mélange des couleurs matérielles**" et le "**mélange des couleurs impalpables**", conciliant ainsi la pratique picturale du mélange du bleu, du rouge et du jaune avec les explications récentes de Newton sur la lumière.

- Le premier type de mélange concerne la peinture et produit toutes les couleurs par le mélange des couleurs "*primitives*" bleu, rouge et jaune. Le mélange des trois primaires menant à une "*privation*" de lumière, c'est à dire au noir.

- Le deuxième type de mélange concerne les couleurs "*impalpables*" de Newton (comprenez les lumières, par opposition aux matières). Le mélange des couleurs primitives produit ici un "*excès*" de lumière, c'est à dire le blanc.

Le Blon ne précise pas quelles sont les couleurs primitives impalpables. Est-ce qu'il a en tête la même triade bleu, rouge et jaune que pour le mélange matériel ? Ou les 7 couleurs de Newton** ? Voire la série "infinie" des couleurs composant le spectre ?

* **J. C. Le Blon** est un graveur allemand célèbre pour avoir mis au point un procédé d'impression en trois couleurs (bleu, rouge et jaune). On en reparle dans la suite. Le livre traite de la reproduction en peinture des ombre et des lumières pour le portrait et le nu.

J. C. le Blon, *L'Harmonie du coloris dans la peinture; reduite en pratique mecanique et à des regles sures & faciles : avec des figures en couleur, pour en faciliter l'intelligence, non seulement aux peintres, mais à tous ceux qui aiment la peinture.*, Londres, 1725.

Pour la citation voir p. 17 du cours.

** cf. 03Lumière et spectres.pdf, p. 3

Actuellement, on classe les différents procédés de synthèse en deux grand types : la **synthèse additive** et la **synthèse soustractive**.

Cette répartition découle de l'opposition mélange de lumière/mélange de matière telle que la concevait déjà plus ou moins Le Blon. Des explications simplistes la résument encore toujours de cette manière,

- le mélange de lumière correspondant à la synthèse additive
- le mélange de matière correspondant à la synthèse soustractive.

Toutefois, une définition rigoureuse des ces deux termes ne peut pas se faire par les seuls moyens engagés dans le mélange (lumière ou matière). Lumière et matière sont de toute manière toujours utilisées de concert.

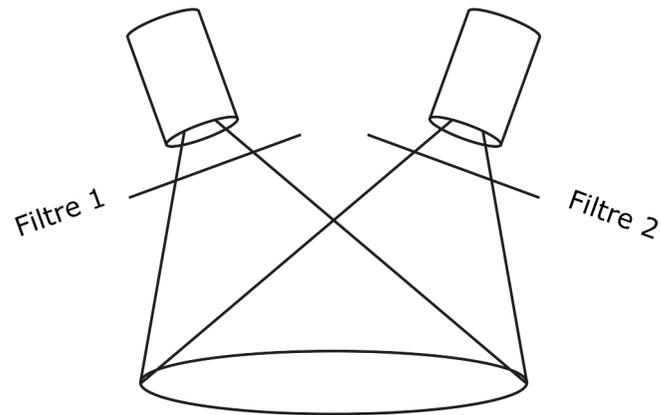
Le plus simple pour expliquer la différence entre la synthèse soustractive et la synthèse additive et pour expliquer l'emploi de ces deux adjectifs ("additif" et "soustractif"), c'est d'illustrer chacune des deux synthèses par un dispositif type.

Avec cette astuce particulière : les deux dispositifs utilisent les mêmes spots de lumière blanche et les mêmes filtres transparents colorés. La différence soustractif/additif ne se fait que dans l'agencement de ces moyens.

Ces deux dispositifs sont décrits à la page suivante (p. 4).

Dans les pages 5 à 9, la comparaison additif/soustractive continue, fournissant les bases des connaissances actuelles sur ces deux grands types de synthèse, et préparent à la suite, où l'exploration plus historique de la reproduction des couleurs reprend.

Synthèse additive



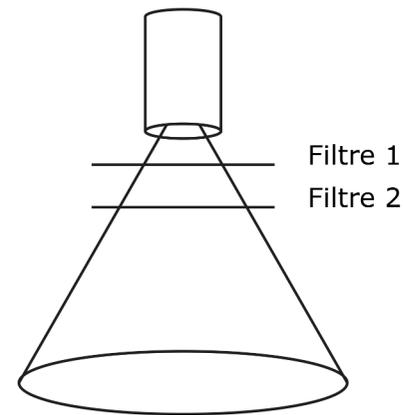
Par absorption, chaque filtre transforme la lumière blanche émise par les spots en lumière colorée.

Puis, et c'est seulement là que se joue l'addition, ces deux lumières colorées se combinent **-s'additionnent-** pour former une nouvelle lumière, plus "riche".

Cette nouvelle lumière est réfléchiée par la surface (blanche) et arrive dans vos yeux.

Le point important ici : **Les deux faisceaux lumineux se superposent.**

Synthèse soustractive



Chaque filtre absorbe **-soustrait-** une partie de la lumière blanche émise par le spot. Le premier filtre en absorbe une partie, le second filtre absorbe une partie de ce qui reste après le premier filtre.

Chaque filtre "appauvrit" la lumière de départ.

Cette nouvelle lumière est réfléchiée par la surface (blanche) et arrive dans vos yeux.

Le point important ici : **Les deux filtres se superposent** devant le même faisceau lumineux.

Synthèse additive

Au cours, avec deux projecteurs dia et des diapositives dans lesquelles étaient montés des filtres colorés transparents, vous avez pu observer le dispositif de base de la synthèse additive.

Dans une synthèse additive, comparativement aux deux couleurs de départ, la couleur du mélange est :

- **plus lumineuse**
 - souvent **plus blanche** (d'une saturation plus faible*)
- Une perte de chroma pourrait donc résulter de cette blancheur.
- La teinte est quelque part entre la teinte des deux couleurs de départ, mais pourrait-il en être autrement ?



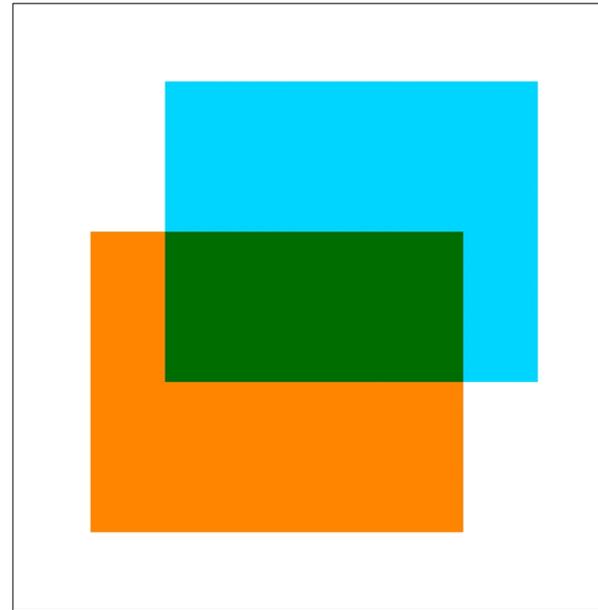
* À l'extrême, si les deux couleurs de départ sont complémentaires, la saturation du mélange est nulle (le mélange est blanc).

Synthèse soustractive

Au cours, avec un rétroprojecteur sur lequel se superposaient des filtres colorés transparents, vous avez pu observer le dispositif de base de la synthèse soustractive .

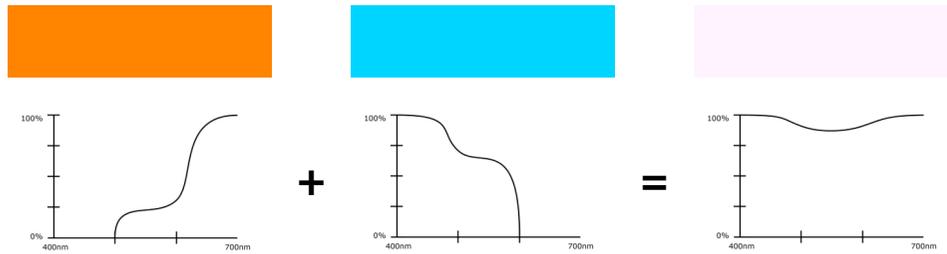
Dans une synthèse soustractive, comparativement aux deux couleurs de départ, la couleur du mélange est :

- **moins lumineuse**
 - souvent **plus noire** (d'un chroma plus faible*)
- Une perte de chroma pourrait donc résulter de cette noirceur.
- La teinte ici aussi est forcément intermédiaire.



* La saturation, elle, même si on a pas observé le fait au cours, pourrait augmenter.

Synthèse additive



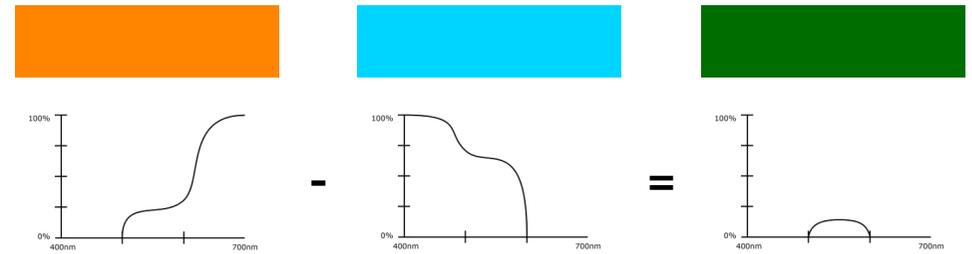
Les quantités* de chaque longueur d'onde de l'orange s'additionnent aux quantités de chaque longueurs d'onde du bleu.

Résultat : pour chaque longueur d'onde la quantité est supérieure (ou au moins égale) à la quantité de la couleur qui en contenait le plus.

La modélisation dans Photoshop est réalisée en fusionnant les différents calques en mode "Densité linéaire- (Ajout)", mode qui modélise un mélange additif, et en utilisant un gamma de 1.0 pour plus de réalisme.

* ou les pourcentages de transmission, ou de réflexion.

Synthèse soustractive



Les pourcentages de transmission de chaque longueur d'onde de l'orange sont multiplier par les pourcentages de transmissions de chaque longueur d'onde du bleu.

- Par exemple dans le premier tiers du spectre : $0 \% \times 100 \% = 0 \%$
L'orange ne transmet pas les longueurs d'onde courtes. Donc, même si le bleu les transmet, leur superposition ne transmet rien.
- Par exemple dans le deuxième tiers du spectre : $23 \% \times 66 \% = 15 \%$
L'orange transmet très peu les longueurs d'onde courtes (23%). Le bleu les transmet un peu plus (66%). Leur superposition ne transmet que 23 % de 66 %, c.-à-d. un peu moins d'un quart de 66 %, c.-à-d. 15 %.
- Dans le dernier tiers du spectre on retrouve le cas du premier tiers du spectre : $100 \% \times 0 \% = 0 \%$

Résultat : pour chaque longueur d'onde la quantité est inférieur (ou au moins égale) à la quantité de la couleur qui en contenait déjà le moins.

La modélisation dans Photoshop est réalisée en fusionnant les différents calques en mode "Produit", mode qui modélise un mélange soustractif, et en utilisant un gamma de 1.0 pour plus de réalisme.

Synthèse additive

Primaires : **rouge vert bleu** (RVB)

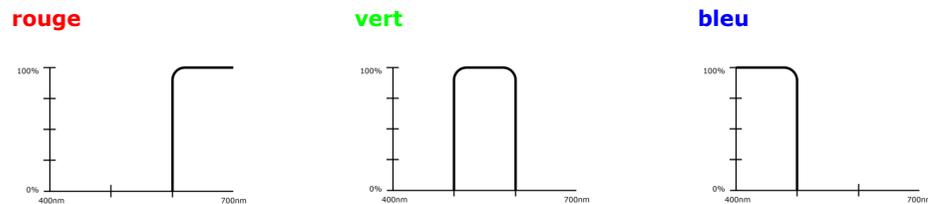
Elles sont parfois dénommées au 19^e S "rouge, vert, et violet".

Remarquez l'imprécision du **vocabulaire**. Les mots rouge, vert et bleu ne signifient pas les mêmes teintes selon que vous considérez les couleurs élémentaires ou les primaires additives.

Si le rouge RVB est presque d'une teinte élémentaire, le vert RVB est une teinte binaire vert-jaune et le bleu RVB est une teinte binaire bleu-rouge.

Dans l'usage, c'est un bon réflexe de dire, par exemple, "**bleu élémentaire**" ou à l'inverse "**bleu RVB**" pour préciser dans quel domaine du vocabulaire coloré vous vous placez et donc de quel bleu vous parlez exactement.

Les primaires additives ont des "**spectres étroit**", couvrant à peu près **1/3** du spectre.



Spectres de transmissions idéaux de trois filtres RVB ou spectres de trois lumières RVB.

Les couleurs que vous voyez sont les primaires des écrans actuels (profil sRGB).

Synthèse soustractive

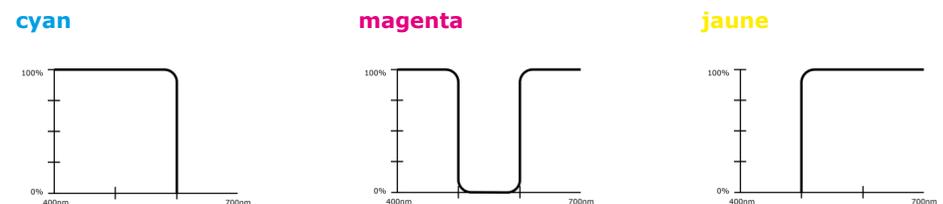
Primaires : **cyan magenta jaune** (CMJ)

Elles découlent des primaires "bleu, rouge, jaune" qui apparaissent au 17^e S et qui n'ont jamais été définies avec précision.

Au 19^e S et au début du 20^e S, il est courant continuer à les appeler "bleu, rouge, jaune".

Le cyan est un bleu légèrement vert, le magenta un rouge-bleu nettement binaire. Le jaune est assez proche du jaune élémentaire, plutôt rougeâtre que verdâtre.

Les primaires soustractives ont des "**spectres larges**", couvrant à peu près **2/3** du spectre.

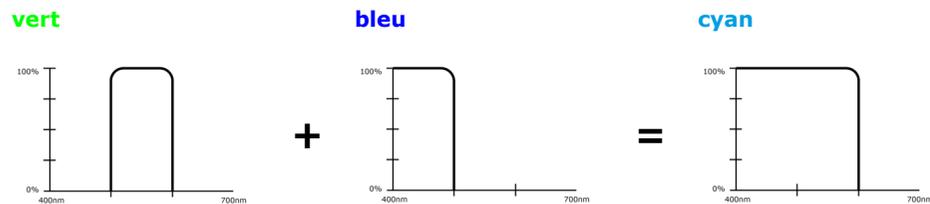
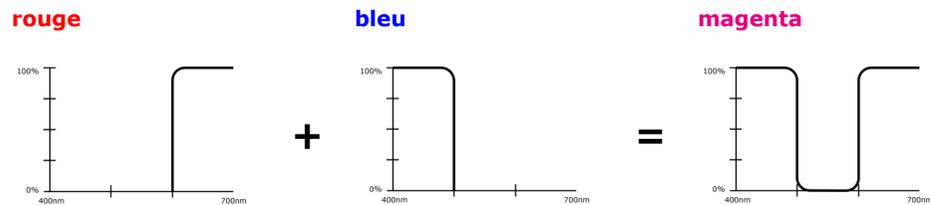
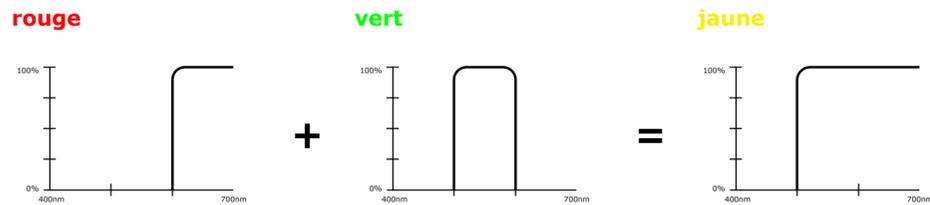


Spectres de transmissions idéaux de trois filtres CMJ.

Les couleurs que vous voyez sont les primaires des impressions offset actuelles (profil FOGRA 39 convertit en sRGB).

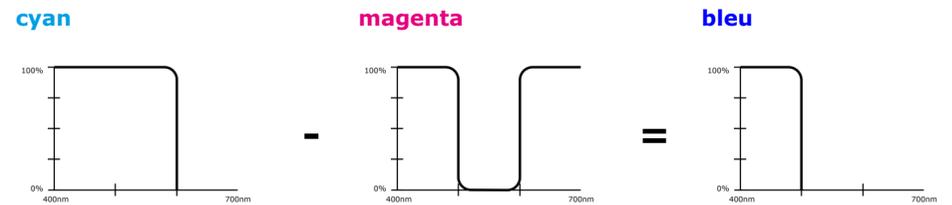
Synthèse additive

Les primaires RVB ont forcément des spectres étroits, c'est pour cette raison qu'elles sont choisies : Puisqu'on va les additionner mieux vaut démarrer de spectres étroits qui serviront à produire des spectres larges.
Des primaires aux spectres plus larges ne produirait que des couleurs blanchâtres, peu saturées.

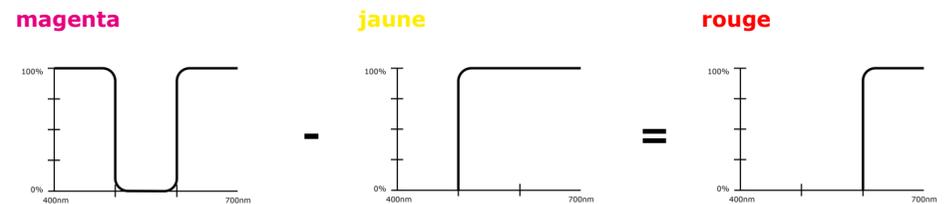
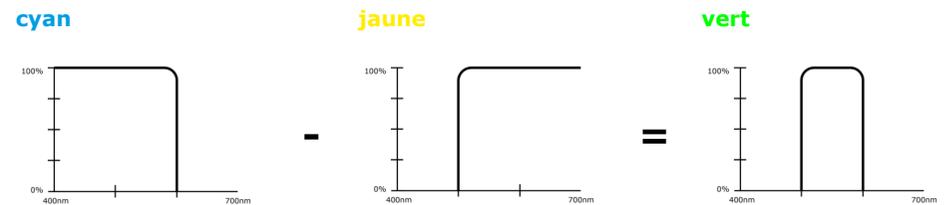


Synthèse soustractive

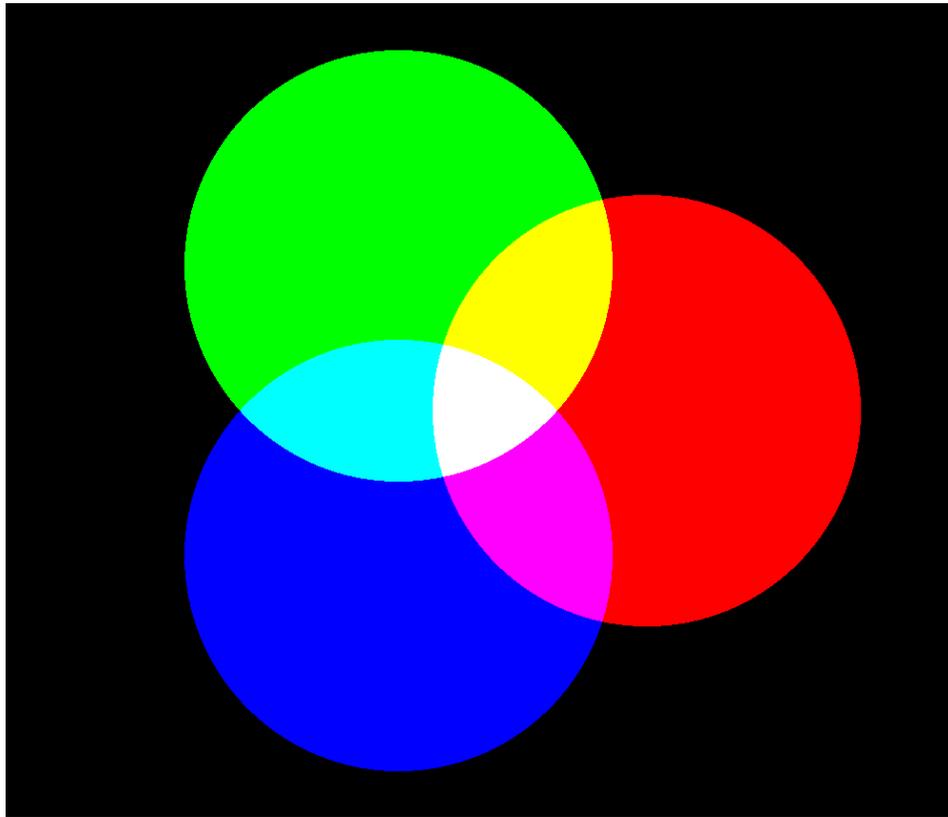
Les primaires CMJ ont forcément des spectres larges, c'est pour cette raison qu'elles sont choisies : Puisque le résultat de leur synthèse soustractive va être réduit à leur portion commune, il faut qu'elles aient une portion commune.
Des primaires aux spectres plus étroits ne produirait que des couleurs noirâtres.



Seul la portion bleue du spectre (la lumière bleue) parvient à traverser à la fois un filtre cyan et un filtre magenta.



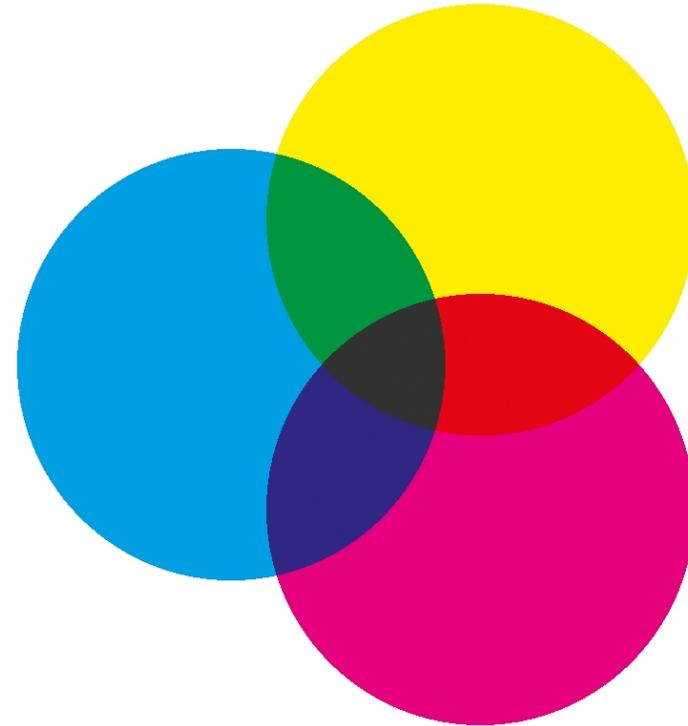
Synthèse additive



- Les trois primaires RVB additionnées reforment le spectre entier, produisant du blanc.
 - Les primaires RVB permettent donc de reproduire par synthèse additive les primaires CMJ.
- Même si, dans les faits*, la symétrie n'est pas parfaite : comparez le "cyan RVB" avec le "cyan CMJ", ou le "vert RVB" avec le "vert CMJ", ...

* Les "faits", ici, correspondent à un écran standard (RVB - profil sRGB) et des encres offset standards (CMJ - profil FOGRA 39).

Synthèse soustractive



- Les trois primaires CMJ superposées soustraient (absorbent) toute la lumière, produisant du noir.
- Les primaires CMJ permettent donc de reproduire par synthèse soustractive les primaires RVB.

Le Blon, premières impressions en trois couleurs

Dans le premier quart du 18^e S, Jakob Christof **Le Blon** met au point un procédé d'impression en trois couleurs (bleu, rouge et jaune, les trois primaires de son époque).

Son idée est de reproduire des peintures à moindre coût.

Trois plaques de cuivre différemment gravées sont encrées l'une en bleu, l'autre en rouge et la troisième en jaune et les trois sont imprimées les unes sur les autres sur un même papier. Les encres sont transparentes. Elles réalisent une **synthèse soustractive** (par rapport au schéma de la p. 4, la seule différence est que les filtres -les encres- sont placés sur la surface blanche -le papier-).

La gravure des plaques se fait à la main. Pour graver la plaque qui servira à l'encrage bleu, Le Blon doit observer la peinture qu'il veut reproduire et deviner les quantités d'encre bleu qui sont nécessaires à chaque endroit du tableau. Idem pour la plaque rouge et la plaque jaune.

Le Blon utilise la technique de gravure dite à la manière noire (ou mezzotinte) car celle-ci permet d'obtenir une modulation continue des niveaux d'encrage (elle permet, dans le cas où on n'utilise que de l'encre noire, d'obtenir tous les niveaux de gris, contrairement aux autres techniques de gravure où le choix se réduit au blanc pur ou au noir pur).

Dans un premier temps, on prépare la plaque en y formant uniformément sur toute sa surface des micro trous (on la "graine") à l'aide d'un outil qu'on appelle un berceau. A l'encrage, c'est dans ces petits trous que l'encre va se loger.

La gravure est réalisée au grattoir et/ou au brunissoir, des outils qui servent à aplanir la surface de façon à refermer les micro trous. Plus le grain est gratté, moins l'encre pourra s'y loger.

Ce que Le Blon dessine, gratte, sur sa plaque bleue, c'est donc plutôt le non-bleu : plus il la gratte, moins il y aura d'encre à cet endroit.

Les deux étapes décrites dans l'introduction, l'analyse et la synthèse, sont donc déjà présentes mais si la synthèse repose sur un début d'automatisation, l'analyse est encore purement visuelle et manuelle. L'analyse constitue d'ailleurs le tour de force de Le Blon. La réalisation de ces trois plaques ne devait rien avoir d'évident.

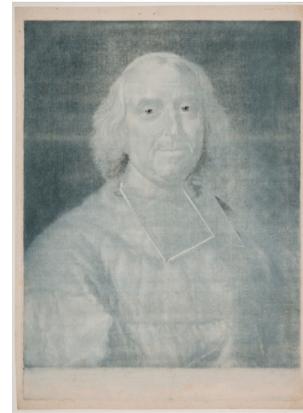
Remarquez que **la question de la quantité de chaque primaire** mise en jeu pour reproduire telle ou telle couleur est une question qui est souvent sous entendue, particulièrement quand on évoque le mélange de peintures. « *Le jaune & Le rouge font l'Orangé* » dit Le Blon. Et, bien sûr, plus de rouge ferait un orangé plus rouge, etc. Mais la question est tellement entendue qu'il ne pense pas à le préciser.

Ici, dans ce procédé à la manière noire, la quantité de chaque primaire se joue dans ce qu'on a appelé sans précision le **niveau d'encrage** de chaque encre, ou, pour le dire avec un vocabulaire moins technique, dans **l'épaisseur de chaque couche d'encre** : plus la couche d'encre d'une primaire est fine à un endroit particulier, moins elle est colorée ou colorante, autrement dit plus la quantité de cette primaire y est faible.

Dans les gravures de la page suivante réalisée par Le Blon en 1738, on voit clairement ces variations d'épaisseur, se traduisant pour chaque impression séparée par de couleurs plus ou moins saturées c'est à dire "colorant plus ou moins par transparence le fond blanc du papier".

Lorsque les trois plaques sont imprimées sur un même papier (dernière image) les variations d'épaisseur des trois encres recréent toutes les couleurs de l'original.

Différentes corrections, différents rehauts, ajouts, viennent compléter cette *trichromie*.



Jakob Christof Le Blon (d'après Hyacinthe Rigaud), *Cardinal André Hercule de Fleury*, mezzotinte, 1738, SMK, Copenhagen

YOUNG, début d'une triade de primaires additives

En 1801 Thomas Young, un médecin et physicien anglais, donne une conférence devenue célèbre sur les phénomènes d'interférences, démontrant par ceux-ci la nature ondulatoire de la lumière.

En passant, il en profite pour avancer une supposition qui se révélera fondamentale : il doit exister dans la rétine 3 types de « particules » capables de vibrer chacune pour une couleur différente, définie par sa longueur d'onde. Young suppose dans ce premier temps que ces trois couleurs sont le bleu, le rouge et le jaune.

Assez vite, Young abandonne le bleu, rouge, jaune et opte pour le **rouge, le vert et le violet**, se basant sur la largeur des bandes de différentes couleurs dans le spectre.

Ces particules, dans lesquelles vous aurez reconnu une préfiguration des pigments présents dans les **cônes**, entre en vibration « avec plus ou moins de force » selon que la (ou les) longueur d'onde de la lumière qui les frappe est plus ou moins proche de la longueur d'onde qui les définit.

Par exemple une lumière jaune (monochromatique) fait vibrer les particules qui vibrent avec la lumière verte mais plus faiblement que ne le fait une lumière verte monochromatique. Une lumière jaune fait aussi vibrer les particules qui vibrent avec la lumière rouge.

→ Au 18^e S, la trichromie bleu, rouge, jaune se trouve souvent en opposition avec la théorie newtonienne* selon laquelle il existe sept couleurs primaires ou une infinité. Young tranche le problème : la variable physique (la longueur d'onde) est bien continue ("infinie") et **c'est de la physiologie de la rétine que découle la trichromie.**

* Le Blon lui-même ne reconnaissait aucune contradiction entre sa trichromie pratique et l'optique newtonienne mais certains scientifiques du 18^e S (le plus célèbre étant l'astronome Tobias Mayer) soutiennent alors qu'il n'y a que trois sortes physiques de lumière (une bleu, une rouge et une jaune).

→ Young explique aussi que des « *sensation mixtes* » (résultant de la mise en vibration de deux types de particules rétinienne) peuvent produire « *une idée simple* »* (comprenez une "teinte élémentaire"), comme lorsqu'une sensation rouge et une sensation verte entraînent un jaune élémentaire ou comme lorsqu'une sensation verte et une violette entraînent un bleu élémentaire.

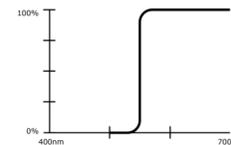
Young a donc compris que, comme on l'exprimerait aujourd'hui, "les pics de sensibilité des photorécepteurs" ne correspondent pas nécessairement aux teintes élémentaires.

→ Young ne semble pas avoir mené d'expériences sur les mélanges. Il relève toutefois que, pour reprendre encore le même exemple, le mélange d'une lumière verte (monochromatique ou non) et d'une lumière rouge (monochromatique ou non) donne une lumière jaune, puisque celui-ci produit la même « *sensation mixte* » qu'une lumière jaune monochromatique.

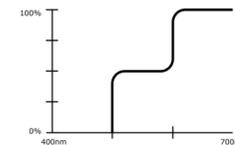
C'est ce qu'on appelle aujourd'hui **le métamérisme** (cf. 04Système visuel.pdf, p. 5) et c'est le point important, celui qui **permet la reproduction trichrome**. Il signifie que reproduire une couleur ce n'est pas (ou pas souvent) synthétiser une lumière physiquement équivalente**, mais juste synthétiser une lumière visuellement équivalente.

Exemple :

Spectre de réflexion d'un pigment orange :



Spectre de la lumière émise par un écran pour en reproduire la couleur :



* **Thomas Young**, Chromatics, in *Supplement to the fourth, fifth, and sixth editions of the Encyclopaedia Britannica*, vol, 3, 1824, p, 141

** ou une matière réfléchissant ou transmettant une lumière physiquement équivalente.

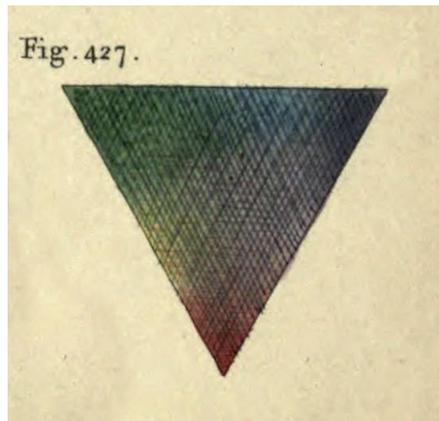
Donc, sans vraiment le nommer, ni le distinguer du mélange des peintres, Young évoque le **mélange additif**. Et il est clair pour lui que le mélange additif de trois lumières (une rouge, une verte et une violette) en différentes intensités, permet de reproduire toutes les couleurs.

Dans la planche ci-dessous illustrant un texte de 1807, Young montre « une figure triangulaire, présentant théoriquement toutes les nuances de couleurs possibles. Le rouge, le vert et le violet sont seuls à leurs sommets respectifs et s'estompent progressivement vers les côtés opposés. »*

Le texte précise que les couleurs présentes dans le triangle peuvent encore varier par « différents degrés de lumière »** (niveaux de luminosité).

Young propose de réaliser les différentes couleurs par un système complexe utilisant des surfaces peintes (rouge, verte et violette) mises en rotation rapide. Le procédé est en effet un type de mélange additif (cf. infra Synthèse additive dite *optique temporelle*).

Pourtant, juste après la description du procédé additif, Young ajoute qu'on pourrait aussi le réaliser avec un pinceau. Ce qui prouve que la distinction entre les deux synthèses n'est pas encore claire du tout.

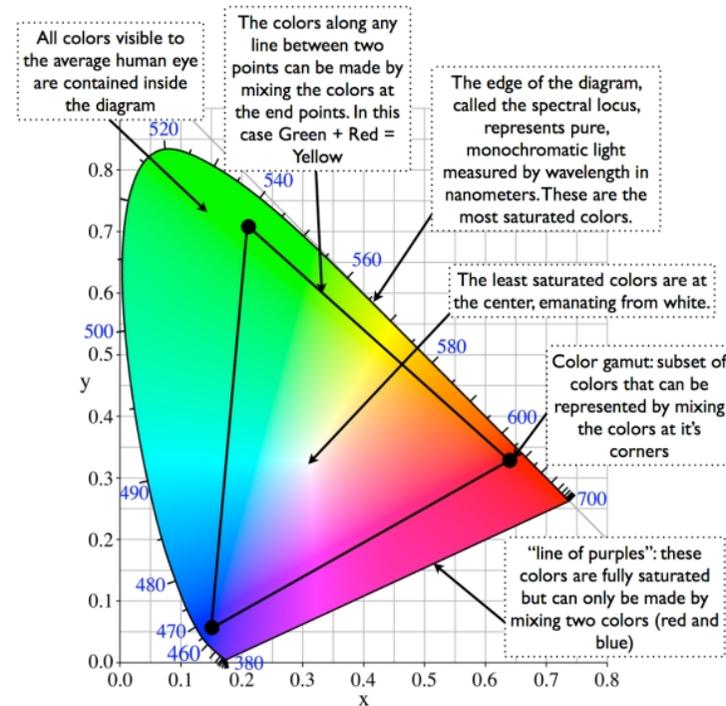


Thomas Young, *A Course Of Lectures On Natural Philosophy And The Mechanical Arts*, vol. 1, 1807, plate XXIX
* idem, p. 786 et ** idem, p. 441

Le principe du triangle n'est pas neuf. Il en existe plusieurs datant du 18^e S dont les sommets sont bleu, rouge et jaune.

Celui de Young, aux sommets rouge, vert et violet, repris dans la deuxième partie du 19^e S par Maxwell, Helmholtz, Grassmann, fournira en quelque sorte les prémisses de la colorimétrie et du *diagramme de chromaticité* (cf. 10Adaptation température irc.pdf, p. 7).

Mais l'histoire de la colorimétrie s'éloigne un peu de l'histoire de la reproduction des couleurs... Juste une image trouvée sur le web, pour vous donner l'envie de creuser (?). Remarquez évidemment le triangle inscrit dans le diagramme de chromaticité.



Anatomy of a CIE Chromaticity Diagram

<https://dot-color.com/2012/08/14/color-space-confusion/>

Maxwell, première photo couleur, analyse et **synthèse additive**

En 1855, James Clerk MAXWELL donne une conférence dans laquelle il reprend l'idée de Thomas Young des trois "particules" rétinienne, ou des trois "sensations", rouge, verte et violette, transmises par trois types de nerfs.*

Il insiste sur un point particulier : « *Chaque nerf agit, non pas, comme certains l'ont pensé, en transmettant à l'esprit la connaissance de la longueur d'une onde lumineuse ou de sa périodicité, mais simplement en étant plus ou moins affecté par les rayons qui l'atteignent. La sensation de chaque nerf élémentaire est susceptible seulement d'augmentation et de diminution, et d'aucun autre changement.* »

Pour mieux faire comprendre à son public comment des simples différences de niveaux pour le rouge, le vert et le violet suffisent à l'esprit pour "créer" toutes les couleurs, Maxwell en vient à décrire une méthode possible de photographie en couleur. Maxwell invente donc la photographie en couleur, non pas pour elle-même, mais juste dans un souci didactique, pour expliquer par analogie le fonctionnement de la rétine.

Voilà comment Maxwell décrit son procédé : « *Supposons qu'il faille déterminer les couleurs d'un paysage à l'aide de clichés pris sur une préparation également sensible aux rayons de chaque couleur. Plaçons une plaque de verre **rouge** devant l'appareil photo et prenons un cliché. Le positif sera transparent là où la lumière rouge était abondante dans le paysage, et opaque [noir] là où elle était absente. Mettez-le maintenant dans une lanterne magique [un projecteur], avec le verre rouge, et une image rouge sera projetée sur l'écran. Répétons l'opération avec un verre **vert** et un verre **violet** et, à l'aide de trois lanternes magiques, superposons les trois images sur l'écran. La couleur de n'importe quel point de l'écran dépendra alors de celle du point correspondant du paysage ; et, en ajustant les intensités des lumières, etc., une copie complète du paysage, en ce qui concerne la couleur visible, sera projetée sur l'écran.* »

En 1861, Maxwell donne une autre conférence. Cette fois, il a réalisé une photographie en couleur d'après la méthode décrite dans sa première conférence, la photographie d'un nœud dans un ruban de tissu écossais sur un fond de velours noir.



Première photographie en couleur prise par Thomas Sutton sur les indications de Maxwell en 1861, reproduction de D. A. Spencer d'après les positifs originaux par le procédé Vivex dans les années 1930 (Scan du livre de Jack H. Coote, *The Illustrated History of Colour Photography*, 1993, p. 15.)

Donc en résumé et pour paraphraser sa description du procédé :

Pour l'**analyse** :

Maxwell a pris trois photographies "noir et blanc" : une à travers un filtre rouge, une à travers un filtre vert, et une à travers un filtre violet. Il en a fait trois positifs (dont les couleurs s'échelonnent de noir opaque > à incolore transparent) sur plaque de verre.

Ces différents niveaux de noir enregistrent **les quantités de lumière** rouge, verte et violette qui étaient présentes en tous points de la scène.



Les trois positifs correspondant respectivement au rouge, au vert, et au violet.



Les mêmes, dans une vitrine au musée Maxwell à Edinburg. On remarque aussi le célèbre disque de Maxwell (« color-top », littéralement "toupie de couleur"). Cf. Infra

Dans la description de son procédé Maxwell précise que les préparations photographiques doivent être « également sensible aux rayons de chaque couleur ». Le problème c'est que les plaques photographiques de l'époque ne sont sensibles qu'à la lumière bleue.

La sensibilité au vert et au rouge ne sera atteinte que vers la fin du 19^e S, avec les plaques et films dit(e)s **panchromatiques**.

Maxwell et Sutton, le photographe qui l'a aidé, ont donc réalisé la première photographie en couleur un peu par coup de bol.

- Pour obtenir l'image "bleue" aucun problème.
- Pour obtenir l'image verte, ils sont obligés de diluer considérablement le colorant (les filtres étaient en fait des colorants en solution), le rendant ainsi moins sélectif, pour parvenir à obtenir une image. Augmenter le temps de pose n'avait rien donné.
- Pour obtenir l'image rouge, ils ne rencontrent aucun problème. Ce qui est étonnant donc. L'explication de ce fait normalement impossible, ne sera trouvée que dans les années 1960 par un ingénieur de la firme Kodak : la sensibilité de la plaque photographique utilisée s'étant du bleu aux ultra-violets **et** le filtre rouge utilisé par Maxwell transmet aussi les UV à l'autre extrémité du spectre **et** beaucoup de tissus rouges de l'époque réfléchissent aussi les UV.

Le positif rouge est donc techniquement un positif UV, mais assez similaire à ce qu'aurait été un positif rouge.

La photographie ci-contre à été réalisée avec une pellicule **orthochromatique** (sensible au bleu et au vert seulement, pas au rouge). On voit sur le drapeau anglais le rouge traduit par un gris beaucoup plus foncé que le bleu.

Les ciels uniformément blancs, sans nuages, des premières photographies découlent du même problème. Le bleu du ciel ou le "rouge-vert-bleu" des nuages blancs ne se distinguent pas l'un de l'autre.



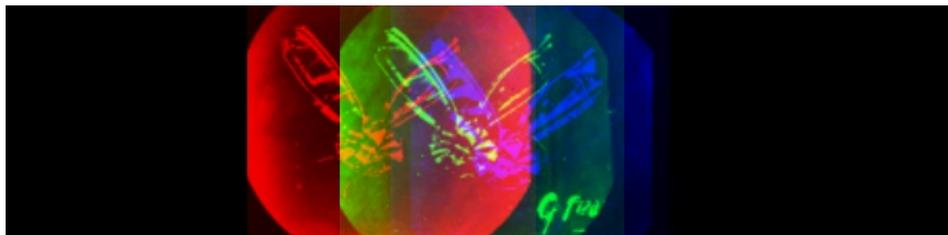
Tannatt David, Shackleton, Ernest Henry, et al. ,1909

Pour la **synthèse** :

Maxwell place chacun des trois positifs, derrière le filtre qui a servi à leur création, dans un projecteur séparé.



Les trois projecteurs superposent les trois images (dont les couleurs s'échelonnent de noir à rouge, vert, ou violet) sur un écran blanc.



La partie **synthèse** correspond donc parfaitement au dispositif type de la synthèse additive (cf. p. 4).
Ce sont les positifs "noir et blanc" qui modulent, qui font varier, la **quantité de chaque primaire**.

La reconstitution dans Photoshop est réalisée fusionnant les différents calques en mode "Densité linéaire- (Ajout)", mode qui modélise un mélange additif.

La reconstitution des filtres est faite avec les primaires actuelles additives des écrans, donc **rouge vert et bleu (RVB)**.

Entre Maxwell et aujourd'hui, il n'est pas facile de savoir si seuls les mots ont changé ("bleu" plutôt que "violet") ou si les primaires sont assez différentes.

Le bleu RVB est un peu rouge, c'est vrai, mais l'est-il plus ou moins que le violet de Maxwell ?

Le vert de Maxwell était-il aussi jaune que le vert RVB ?

On dispose du nom des pigments utilisés par Maxwell et Sutton pour les filtres de cette première photographie mais l'information n'est pas toujours suffisante.

Du Hauron et Cros, "interversion", "antichromatique", analyse et **synthèse soustractive**

La photographie en couleur de Maxwell ne s'incarne pas vraiment dans un "objet". Elle n'existe que par l'intermédiaire du dispositif de projection (triple lanterne magique).

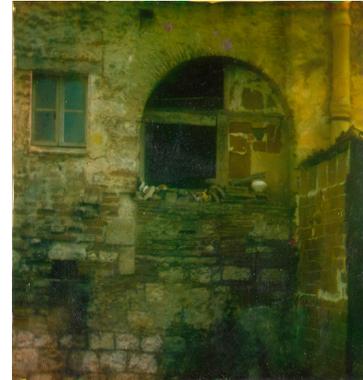
Quelques années plus tard, en 1869, **Louis Ducos Du Hauron** (pianiste, scientifique-inventeur) et **Charles Cros** (poète et scientifique-inventeur lui aussi), soumettent, indépendamment l'un de l'autre, deux mémoires sur la photographie en couleur, proposant chacun de nombreuses solutions pratiques*, assez semblables dans leurs points essentiels, et permettant pour la plupart de créer des photographies couleur sur papier ou plaque de verre.

Ils proposent tous les deux une technique de reproduction par **synthèse soustractive**, identique dans son principe à la méthode de gravure de Le Blon : superposer (sur verre ou sur papier) trois couches transparentes colorées bleu, rouge et jaune dont l'épaisseur varie.

La (grande) différence avec Le Blon, c'est que, dans leur procédé, l'**analyse** se fait, comme chez Maxwell, **par trois photographies** prises chacune à travers un filtre coloré différent.

Pour cette partie analyse, ils arrivent tous les deux à la même solution que Maxwell sans avoir eu, semble-t-il, connaissance de la conférence de ce dernier. Leur cheminement de réflexion est d'ailleurs très différent, découlant plus de la tradition des trois primaires bleu, rouge, et jaune, que des théories récentes sur la rétine ou même sur la lumière.

* Il prédisent la plupart des grands principes techniques tant d'analyse que de synthèse additive ou soustractive, qui ont été ou sont toujours utilisés.



Louis Ducos du Hauron, *Une mesure dans notre voisinage à Agen*, héliochromie, 1877



Détail du bord de l'épreuve ci-dessus : on voit les trois couches de gélatine colorée (rouge, bleu, jaune).

Leur idée principale réside dans le principe que Du Hauron appelle la « méthode d'**interversion** » et Cros « la synthèse par transparence au moyen de positifs **antichromatiques** ».

Ils entendent par là que les filtres servant à l'analyse doivent être chacun de la couleur **complémentaire** à celle de la couche transparente colorée qu'ils servent à produire.

La photographie obtenue à travers le filtre « orange » servira à créer la couche transparente « bleu », celle obtenue à travers le filtre « vert » la couche « bleu », et celle obtenue à travers le filtre « violet » la couche « jaune ».

Le mémoire de Cros reste très théorique. Du Hauron, par contre, s'est vraiment confronté à la réalisation de photographies en couleur par cette technique et donc aux nombreuses difficultés pratiques :

- La première et principale difficulté reste l'absence de plaques photographiques panchromatiques (cf. encadré, p. 15). La manière dont Du Hauron obtient ses trois photographies avant l'avènement des plaques panchromatiques reste un peu mystérieuse.

- L'autre difficulté est que si l'*interversion* est juste dans son principe, les couleurs utilisées par Du Hauron ne sont pas idéales.

Du Hauron part du principe que les trois couches transparentes doivent être **bleu, rouge et jaune**, les couleurs primaires telles qu'on les conçoit depuis le 17^e S.

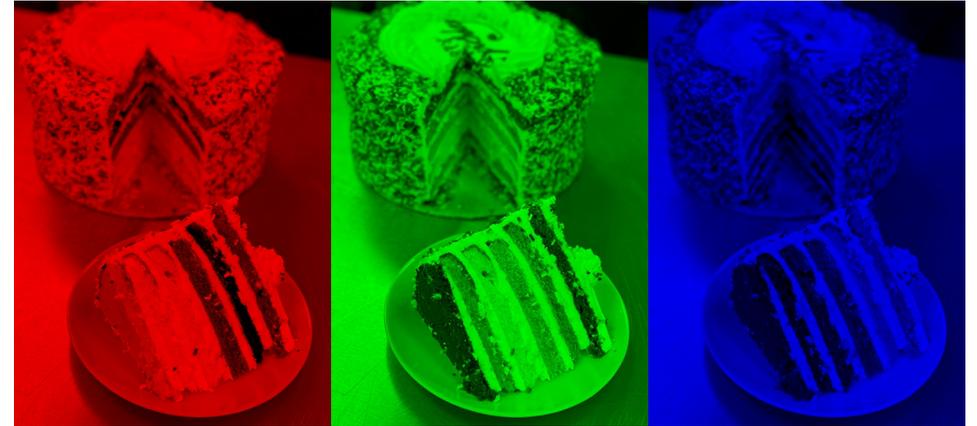
Il s'en suit que les filtres qu'il utilise pour prendre les photographies lors de l'analyse sont eux respectivement, **orange, vert et violet**, les complémentaires que donne le cercle chromatique basé sur le bleu, rouge et jaune.

Pour que le procédé fonctionne parfaitement, outre les plaques panchromatiques, il aurait fallu que Du Hauron utilise trois couches transparentes **cyan, magenta et jaune**.

Et qu'il utilise pour prendre ses trois photographies des filtres ayant comme couleurs leurs complémentaires respectives, c'est à dire **rouge, vert et bleu** (RVB).

Donc, leur idée principale, l'*interversion*, (illustrée avec les primaires actuelles), consiste donc à passer

des quantités de lumières rouge, verte et bleue (RVB)

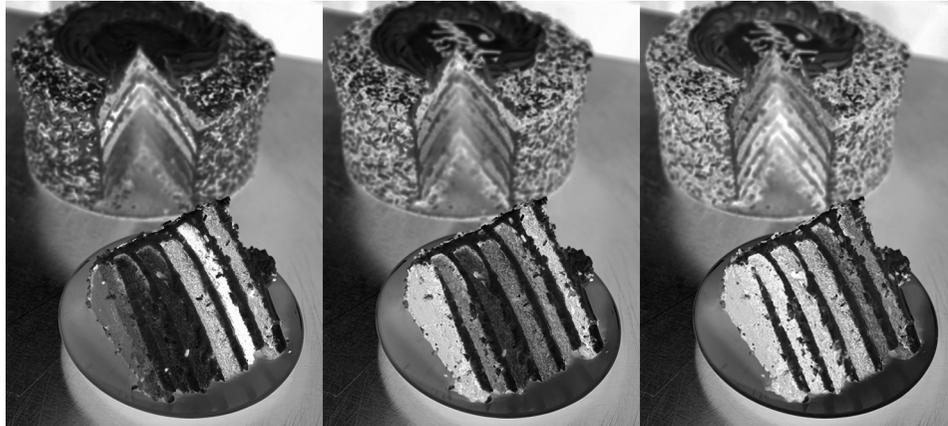


à trois épaisseurs différentes de cyan, magenta et jaune



Le principe (**analyse RVB / synthèse CMJ**) est toujours le même aujourd'hui.

En pratique donc, Du Hauron comme Maxwell prend trois photographies "noir et blanc" : une à travers un filtre rouge, une à travers un filtre vert, et une à travers un filtre bleu (RVB). Il en tire trois négatifs (dont les couleurs s'échelonnent de noir opaque > à incolore transparent) sur plaque de verre.



L'étape suivante, là où a lieu l'*interversion* proprement dite, repose sur l'utilisation d'une **gélatine photosensible**.

Exposée à la lumière, une telle gélatine durcit et elle durcit en outre sur une profondeur qui dépend de l'intensité de la lumière qui l'éclaire.

Donc, techniquement, une fine couche de gélatine est étendue sur un support temporaire et exposée à la lumière en intercalant un négatif transparent entre la source de lumière et la gélatine. On obtient ainsi une gélatine durcie en ces différents points à différentes profondeurs. Par lavage à l'eau chaude, on décroche la gélatine non durcie et obtient une couche de gélatine dont l'épaisseur varie en ces différents points qu'on appelle parfois "**image en relief**". On applique cette couche de gélatine sur un papier.

La technique existe déjà en noir et blanc ("tirage au charbon"), notamment pour créer des copies d'une même photographie. La gélatine est alors colorée en noir.

Du Hauron développe la technique pour la couleur. Il va colorer une gélatine en **cyan**, une en **magenta** et une en **jaune** et les exposer à la lumière en interposant le négatif correspondant respectivement au filtre **rouge**, au **vert** et au **bleu** de l'étape de l'analyse.



Il obtient ainsi trois images en relief, une en gélatine cyan, une en gélatine magenta et une en gélatine jaune.

Pour finir, Du Hauron décolle chacune des trois fines couches de gélatine CMJ de leur support temporaire, et les applique toutes les trois les unes sur les autres sur un même support papier.

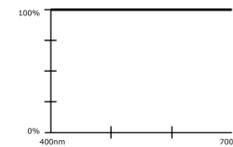
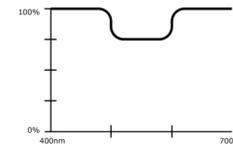
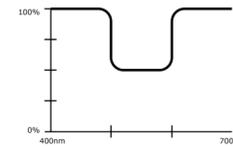
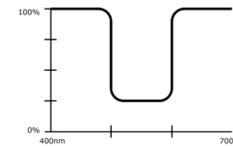
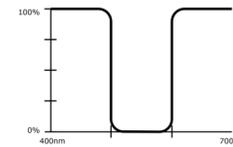


Pourquoi intervertir ? Retour sur la symétrie RVB/CMJ

Pour prendre l'exemple du couple vert/magenta :

- Les zones qui n'émettaient pas de lumière verte dans la scène réelle (noires sur le positif vert) sont traduites par une grande quantité de magenta (une épaisseur maximum de gélatine magenta).
- A l'inverse, les zones qui émettaient beaucoup de lumière verte dans la scène réelle (très vertes sur le positif vert) sont traduites par une absence de magenta (une couche extra mince).
- Et moins radicalement : les zones qui émettaient un peu de lumière verte sont traduites par une couche de magenta assez épaisse ; les zones qui émettaient assez bien de lumière verte sont traduites par une couche de magenta assez fine.

Ce qui s'explique par le fait que **le magenta** (ici la couche de gélatine magenta) **contrôle la quantité de lumière verte**.
On pourrait dire : "Plus il y a de magenta, moins il y a de vert".



De haut en bas :

L'épaisseur de la couche magenta diminue.

Elle absorbe de moins en moins de lumière verte (Elle est de moins en moins *sélective*).
C'est à dire qu'**elle transmet de plus en plus de lumière verte**.

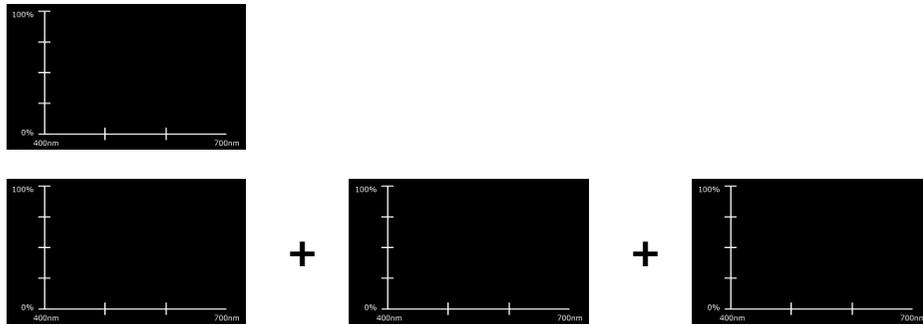
Visuellement, elle apparaît de moins en moins colorée ou colorante (ou, vue sur fond blanc, de plus en plus blanche).

Idem évidemment pour les couples bleu/jaune et rouge/cyan.

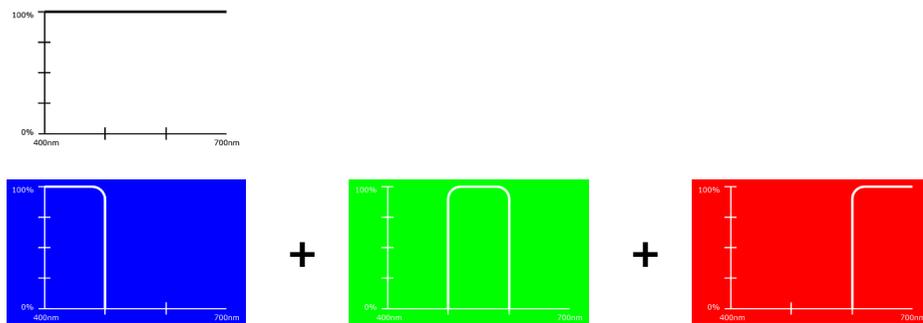
Synthèse additive

Quelques exemples de synthèses en RVB

Synthétiser additivement du **noir** en RVB :



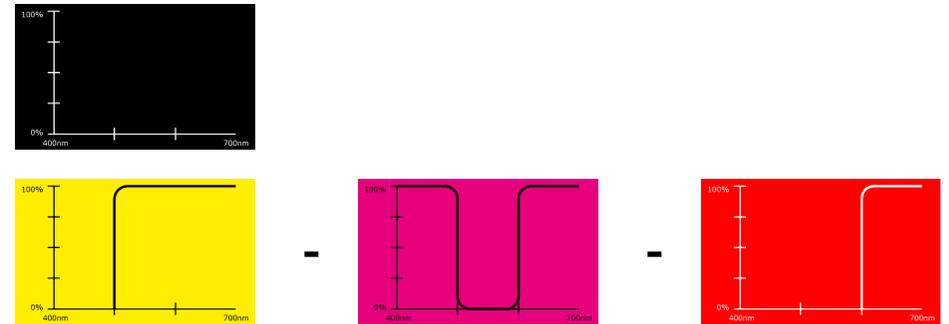
Synthétiser additivement du **blanc** en RVB :



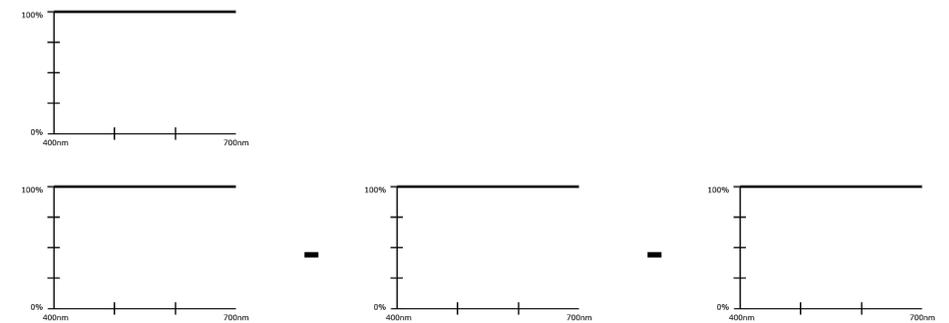
Synthèse soustractive

et en CMJ

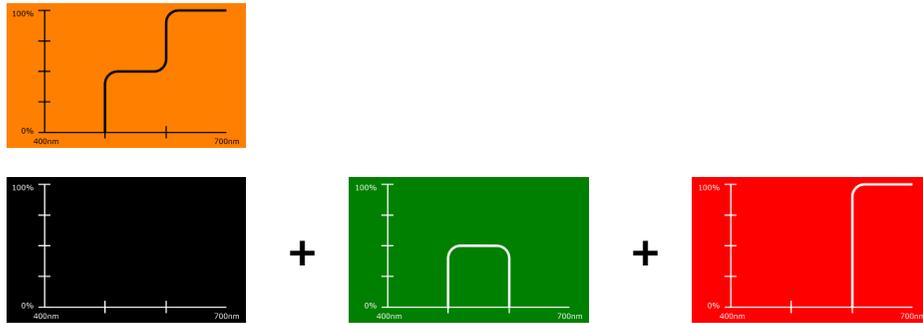
Synthétiser soustractivement du **noir** en CMJ :



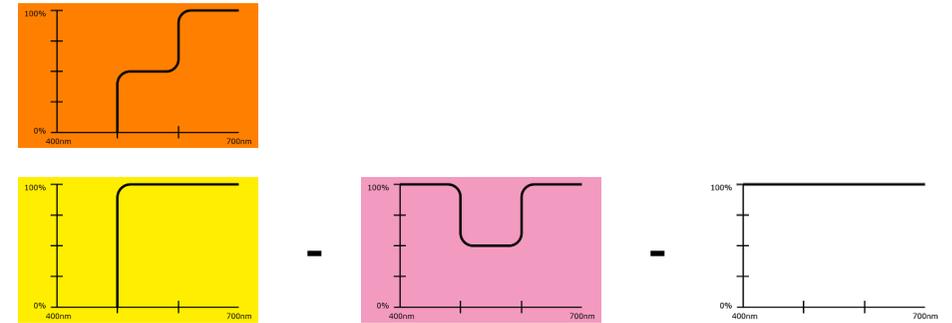
Synthétiser soustractivement du **blanc** en CMJ :



Synthétiser additivement un **orange vif** en RVB :



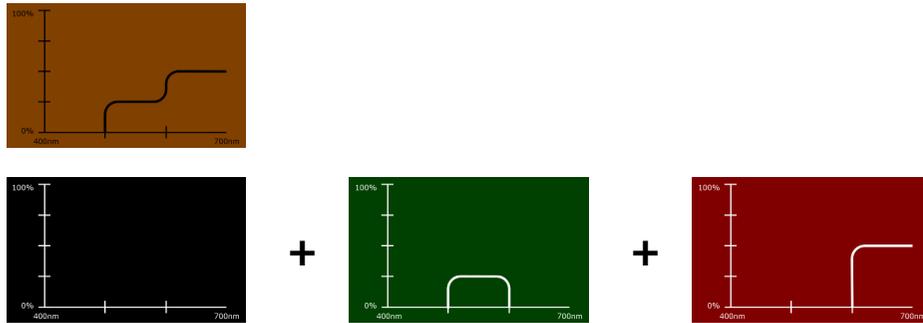
Synthétiser soustractivement un **orange vif** en CMJ :



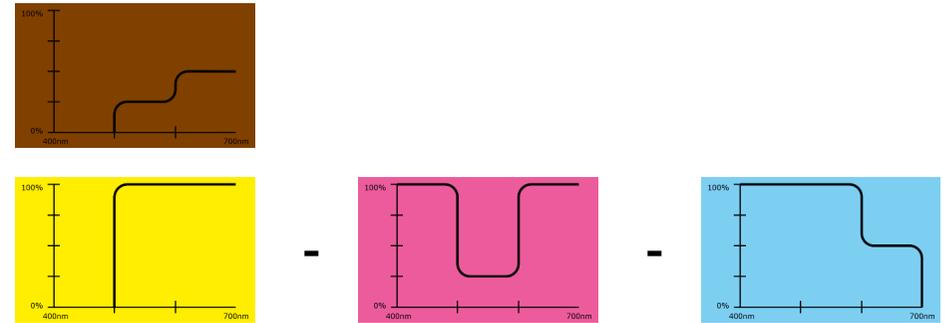
En disant qu'il s'agit de jaune et d'un peu de magenta, on retrouve +ou- une logique du type "peinture".

L'autre manière de comprendre est de dire que le jaune absorbe la lumière bleue ; le magenta en quantité moyenne transmet une quantité moyenne de lumière verte ; et que le cyan est absent pour transmettre toute la lumière rouge.

Synthétiser additivement un **orange noirâtre** en RVB :



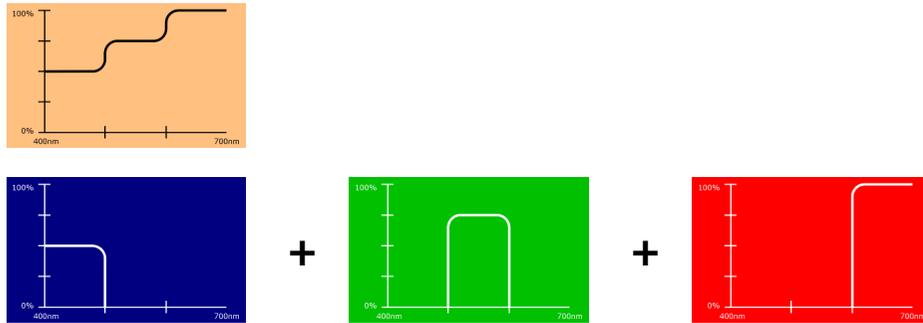
Synthétiser soustractivement un **orange noirâtre** en CMJ :



En disant que **la troisième primaire** (celle dont la quantité est la plus petite, le cyan ici) **noircit le mélange**, on retrouve +ou- une logique du type "peinture".

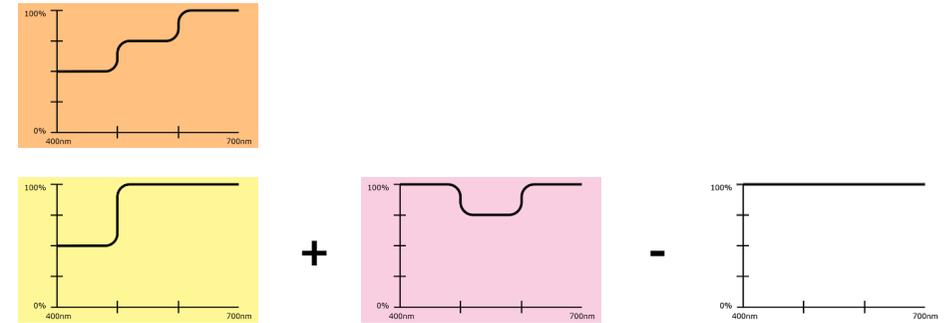
Mais il s'agit toujours de contrôler les quantités de RVB.

Synthétiser additivement un **orange blanchâtre** en RVB :



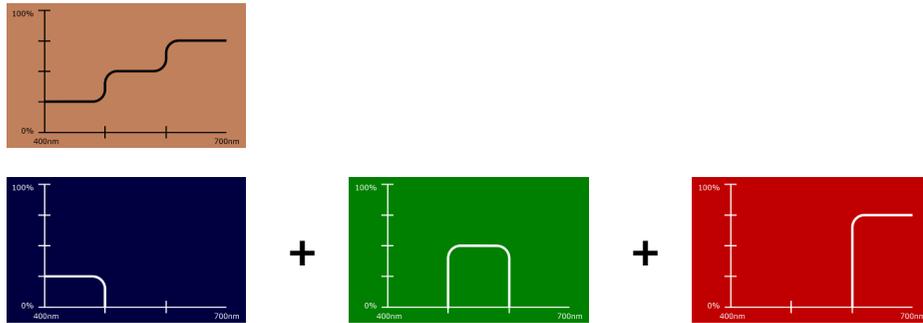
Remarquez qu'ici, en synthèse additive, **la troisième primaire** (celle dont la quantité est la plus petite, le bleu ici) **blanchit le mélange**, ce qui peut ne pas être très intuitif.

Synthétiser soustractivement un **orange blanchâtre** en CMJ :



Les quantités des deux primaires qui interviennent dans le mélange sont déjà faibles (les deux primaires "sont déjà blanchâtres")

Synthétiser additivement un **orange grisâtre** en RVB :



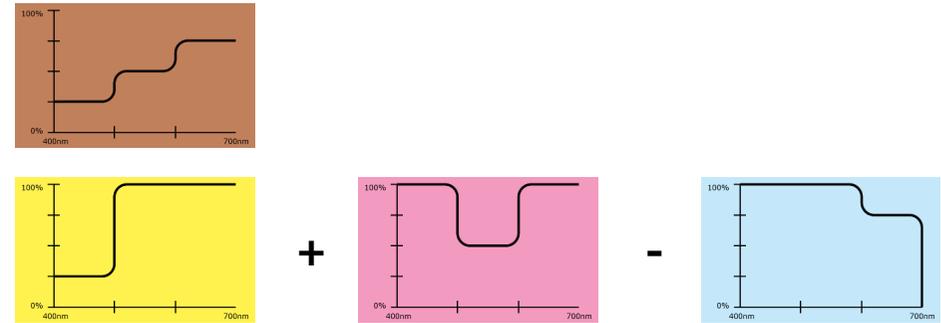
En simplifiant et en idéalisant très fort, on pourrait résumer en disant que :

- La primaire dont la quantité est la plus petite (le bleu ici) donne **la blancheur** (Blanc : 25%).
- La primaire dont la quantité est la plus grande (le rouge ici) donne **la noirceur** (Noir : 25%).
- La différence entre les deux (la plus petite et la plus grande) donne **le chroma** (Chroma : 50%).

Le rapport de quantité entre la primaire dont la quantité est la plus grande (le rouge ici) et celle dont la quantité est moyenne (le vert ici) donne **la teinte**. Avec cette précision : n'intervient dans ce rapport que la quantité que les deux primaires ont de plus que la quantité de la troisième primaire (ici le rouge a une quantité de 50% de plus que le bleu ; le vert a une quantité de 25% de plus que le bleu : c'est donc un rapport 50/25, c'est à dire "deux fois plus de rouge que de vert", qui définit la teinte. C'était déjà le cas dans les trois exemples précédents qui ont tous la même teinte.)

Remarquez que ces règles ont déjà été énoncées sous une forme quasi équivalente dans 06Relation spectre-couleur.pdf. Comparez les deux formulations.

Synthétiser soustractivement un **orange grisâtre** en CMJ :



Idem mais en « *intersion* » donc.