SENITOMÉTRIE APPLIQUÉE

À LA PRISE DE VUE NUMÉRIQUE

Décembre 2014

Charlie Van Damme.

Sommaire

Introduction : sensitométrie, de quoi s'agit-il ? page 4

Unités et valeurs page 6

Mécanismes de la vision. page 11

Récapitulatif. page 14

La chaîne de fabrication argentique. page 15
Principes de base

Latitude d'exposition et latitude de pose page 16

Sensitométrie Argentique page 17
Mise en œuvre des essais sensitométriques en argentique.

Le Gamma page 21

Quelques manipulations possibles page 26

Sensitométrie numérique page 28
Préambule.

Analogies et différences argentique / électronique page 29
L'analyse trichrome

La sensibilité spectrale page 30

La notion de gamma en vidéo. page 31

Le waveform et la sensitométrie. page 33

Caméras pour la télévision et caméras pour le cinéma. page 35

La sensibilité à la lumière page 36

Latitude de pose et quantification numérique. page 37

Mise en œuvre d'une sensitométrie numérique d'utilisateur page 45
Enregistrement d'un coin de Goldberg
Construction du coin de Goldberg

Cinq courbes sensitométriques page 47

Contraintes de ces dispositifs page 51

La question du gris neutre. page 52

Analyse en projection. page 52

Application en prise de vues : Zone System page 54

Sensitométrie et colorimétrie page 56

Conclusions page 62

Annexes.

Notes à propos de l'étalonnage page 64

Le développement argentique page 66

L'essai de key light page 68

Quelques sites, sources et ouvrages. page 70

SENITOMÉTRIE APPLIQUÉE À LA PRISE DE VUE

Introduction : sensitométrie, de quoi s'agit-il ?

Photographier ou filmer, en argentique comme en numérique, c'est, entre autres, reproduire des éléments du réel en 3D (paysages, personnes, objets) sur un support 2D. C'est à la base une reproduction « mécanique ».
Du point de vue du fabricant, le seul critère indiscutable de la qualité des systèmes de reproduction est sa capacité à produire une image qui *"ressemble"* le plus possible au *"modèle"*, tant du point de vue des formes et de la perspective (ça concerne l'optique) que des valeurs lumineuses et (éventuellement) colorées (ça concerne la sensitométrie).

Méthodes d'appréciation de la qualité des images.

1° méthode : appréciation subjective. Elle n'est pas satisfaisante pour le fabricant : les goûts ne sont pas quantifiables. Mais le fabricant ne peut pas l'ignorer : c'est un des critères de qualité sur lequel l'usager non professionnel ou professionnel peut s'appuyer.

2° méthode : la comparaison scientifique de la reproduction avec le modèle. On mesure et on chiffre les écarts. Une image parfaite serait alors celle dont les écarts avec le modèle seraient négligeables, voire non mesurables.

Mais :

1° : Aucune image n'offre la possibilité de reproduire fidèlement la totalité des valeurs lumineuses que l'on peux rencontrer dans la nature, que ce soit en termes de luminosités ou de densités, de contrastes et de couleurs. Il faut donc donner « l'illusion » que l'image représente « fidèlement » toutes les nuances de couleur et de luminosité.
2° : Les écarts de luminosité que l'on peut rencontrer dans le réel sont énormes. Ils dépassent même notre aptitude à les discerner tous confortablement. Réduits à des écarts sensiblement inférieurs sur l'image, ils nous « semblent » pourtant représenter fidèlement le réel. Il faut donc se référer aussi aux mécanismes physio - psychologiques de notre système de vision pour expliquer ce mystère.

Aucun fabricant sérieux ne peut se passer d'investigations sensitométriques, que ce soit en argentique ou en numérique. Les fabricants de supports argentiques ont toujours largement diffusés la totalité des caractéristiques sensitométriques de leurs produits, et en particulier la courbe sensitométrique qui visualise ces caractéristiques. En numérique par contre, il est rare qu'on en fasse autant. On se contentent la plupart du temps de nous donner la latitude d'exposition ou dynamique (autant de stops), car c'est à leurs yeux un argument quantitatif publicitaire décisif. ARRIFLEX fait exception, mais s'arrête avant l'image projetée : on a droit aux valeurs numériques qui entrent dans le projeteur, mais pas aux valeurs **de l'image mesurées à l'écran**. Or, c'est la qualité de **l'image finale** qui nous intéresse, plus que tout autre considération.

La sensitométrie est une technique qui permet de mesurer comment l'image modifie les brillances du sujet (le réel), des valeurs les plus sombres aux va-

leurs les plus claires. C'est une relation de cause à effet qui est quantifiable. Le tracé de la courbe sensitométrique visualise ces modifications et nous permet d'en apprécier qualitativement les effets.

La sensitométrie permet :

1° de comparer quantitativement et qualitativement des procédés de fabrication d'images photographiques et cinématographiques (argentiques, numériques).

2° d'estimer la dynamique utilisable sur telle caméra avec tel réglage, en stops (la latitude d'exposition).

3° Quand une dynamique nous est donnée par le fabricant, de découvrir ce qui se passe entre les deux extrémités de cette dynamique (voir "Cinq Courbes", page 47). D'exposer en conséquence et de manière raisonnée (utilisation du spot mètre, le « zone system », page 54).

3° de vérifier qualitativement la chaîne de fabrication (le work flow).

4° d'identifier d'éventuels disfonctionnements dans cette chaîne, des dérives qualitatives, de les chiffrer, de les corriger.

5° de régler cette chaîne de fabrication selon des besoins spécifiques, techniques et/ou artistiques. C'est à dire, d'y introduire aussi des « défauts » (des écarts par rapport à la norme) qui nous semblent nécessaires pour obtenir le résultat souhaité.

6° de garder la mémoire de certains effets ou réglages, de les reproduire sur un autre film, avec une autre caméra, ...

Quelques grandeurs d'écarts lumineux, en valeurs linéaires, et leurs traductions en valeurs logarithmiques : des stops *(voir Unités et Valeurs, page 7)*.

- L'écart maximal dans le réel, non compte tenu de l'éclat du disque solaire : plus de 1 à 524.000 (on dit : 19 stops). Face à une telle dynamique, notre vision sature, nous sommes éblouis.

- L'écart de luminosité (ou le contraste, la dynamique) que l'œil peut percevoir dans de bonnes conditions : de 1 à 2000, voire 4000 (11 stops et plus).
- Un positif argentique de projection très performant : jusqu'à 1 à 16000, soit 14 stops. (À quoi bon? Cela dépasse largement nos possibilités perceptives en projection, en particulier dans les noirs).

- Les négatifs de prise de vues les plus performants : 1 à 16000 (14 stops : une telle dynamique n'est utile que pour disposer d'une marge d'erreur à la prise de vue, dite "latitude de pose").

- Un écran d'ordinateur : de 1 à 256 (soit 8 stop)
- Une bonne projection numérique : de 1 à 256 (8 stops) et plus parfois (ce qui n'est pas nécessairement souhaitable)

- Une photo N/B sur un excellent papier, une charte de gris : +/- de 1 à 32 (5 stop)

- Une photo dans un journal : de 1 à +/- 4 (2 stops)

- Une bonne caméra numérique peut discerner jusqu'à 13, 14 stops (de 1 à 8200/ 16000)

- Une caméra de télévision basique : à peine plus de 6 stops (de 1 à 64).

Cet écart de luminosité, on l'appellera dorénavant « dynamique » ou « latitude d'exposition » pour qu'il n'y ait pas de confusion avec « contraste », terme qui peut renvoyer à une interprétation subjective. « Dynamique » a l'avantage de renvoyer directement à des quantités mesurables, comme en son (une dynamique de 30 dB par exemple)

Note : en image, 6dB = 1 stop.

Important : il est illusoire de penser que le directeur de la photographie pourra, à la seule vue d'une courbe sensitométrique, se faire une idée précise des qualités et défauts d'une pellicule ou d'une caméra numérique. Les données sensitométriques doivent être corrélées avec des essais filmés pour faire sens.

La sensitométrie née de l'argentique n'est pas applicable telle qu'elle à la prise de vue cinématographique numérique.
En effet, à chaque étape de la fabrication en argentique, on obtient des images analogiques quantifiables, en densité.
En numérique par contre, seul les images à l'écran sont quantifiables, en luminances. Or, la luminance et la dynamique dépendent largement des appareils qui produisent ces images (visée, moniteurs, projecteurs).

Par ailleurs, le capteur réagit de manière linéaire aux luminations, alors qu'en argentique, la réaction est logarithmique (comme l'œil).

Le signal numérique se quantifie en nombre de bits, ce qui ne nous renseigne pas directement sur les performances sensitométriques des appareils.
Autant de différences qui sont loin d'être insurmontables.

Pour aborder cette science, il faudra apprendre à jongler avec les unités et valeurs utilisées couramment.
Il faudra aussi débroussailler les mécanismes de la vision, puisque, in fine, c'est en référence à ceux-ci que se définissent les critères techniques de ce qu'est une « bonne image ».

Unités et valeurs.

Valeurs linéaires et logarithmes.

Les valeurs linéaires (on dit aussi : série linéaire ou arithmétique) sont celles que nous utilisons tous les jours pours en comptabilité, pour apprécier des distances, des poids, etc.
Exemple : 1,2,3,4,5,6, …1000, … où 2 est le double de 1, 3 le triple de 1, 4 le quadruple… 1000 mille fois plus que 1
Les luminosités (lux, lumens, candelas, etc.) s'expriment en valeurs linéaires.

Il se fait que nos sens, l'ouï et la vue en particulier, ressentent les variations quantitatives « comme » une série géométrique, où 2 reste le double de 1, mais 4 devient le triple de 1, 8 le quadruple, 16 le quintuple… et 1024 dix fois plus que 1.
Il faut donc compter autrement pour rendre compte de nos sensations : 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024,…. (on arrondit en général : 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, *125, 250, 500, 1000...*

C'est une série géométrique de raison (ou de facteur) « 2 » où chaque nombre entier est le double du précédent.
2 est le double de 1,
4 le double de 2,
8 le double de 4, etc.

Aussi, plutôt que de travailler avec des nombres qui sont sans rapport avec nos sensations, on utilise souvent les logarithmes de ces valeurs, mais arrondies. Cela facilite en outre les calculs.

Par définition, le logarithme en base « *n* » d'un nombre réel positif est la puissance à laquelle il fut élever la base pour obtenir ce nombre.

Nous n'utiliserons que les logarithmes en base 10 qui s'écrivent simplement « log ».
Par exemple le logarithme en base 10 :
de 10 vaut 1 en valeurs logarithmiques, car 10 puissance 1 = 10 x 1
de 100 vaut 2, car 100 = 10 puissance 2 (10 x10),
de 1000 vaut 3, car 1000 = 10 puissance trois (10x10x10).
En dessous de 10, cela donne :

log1 = 0,
log2 = 0.30,
log4 = 0.60,
log8 = 0.90
log10 = 1
Notre série géométrique 1, 2, 4, 8, … 100, ... 1000 s'écrit en valeurs logarithmiques 0, 0.30, 0.60, 0.90, … 2, ... 3.
On obtient ainsi une série conforme à nos sensations.
Chaque bon de + ou - 0.30 est équivalent à une variation de un « stop » (un diaph) sur la bague des diaphragmes. Chaque bon de 0.10 équivaut à une variation de 1/3 de stop.

Sensibilités ASA :

C'est une échelle USA selon une série géométrique, par 1/3 de stop. En gras, les bonds de 1 stop.

10	12.5	16	**20**	25	32	**40**	50	64	**80**	100	125
160	200	250	**320**	400	500	**640**	800	1000	**1250**	1600	2000

Sensibilité ISO

C'est une échelle qui combine l'ancienne échelle allemande DIN avec l'échelle ASA, normalisation internationale oblige. L'échelle DIN s'écrivait par nombres entiers selon une progression linéaire. Un écart de +/- 1 valait 1/3 stop. Un écart de +/- 3 valait un stop. En principe, une sensibilité en ISO correspondant à 200 ASA, soit 24 DIN s'écrit ISO 200/24°. Dans la pratique courante, on écrit simplement ISO 200. On peut utiliser indifféremment ASA ou ISO.

Echelle EV

De l'anglais "exposure value". On trouve parfois IL (indice de lumination). Cette échelle est souvent utilisée dans les cellules photoélectriques. Elle s'écrit selon une progression linéaire par nombres entiers où un écart de 1 vaut un stop. Les tiers de stops sont indiqués par un ou deux points qui suivent ce nombre. Le référent de **zéro EV** définit la quantité de lumière reçue à une ouverture de f/1, à un temps d'exposition de 1seconde, à 100 ASA. En dessous, ces sont des nombres négatifs. Exemple :

0	0.	0..	**1**	1.	1..	**2**	2.	2..	**3**	3.	3..
4	4.	4..	**5**	5.	5..	**6**	6.	6..	**7**	7.	etc.

Les temps de pose.

C'est aussi une échelle géométrique, en 1/x seconde, par bonds de 1/3 de stop. En gras, par stops entiers (les plus usités en cinéma).

1/10	**1/12.5**	1/16	1/20	**1/25**	1/32	1/40	**1/50**	1/60	1/80
1/100	1/125	1/160	**1/200**	1/250	1/320	**1/400**	1/500	1/640	**1/800**

Note : sur les appareils photographiques, on trouve généralement des valeurs arrondies par stops entiers :

1	1/2	1/4	1/8	1/15	1/30	1/60	1/125	1/250	1/500

Diaphragmes

C'est une échelle géométrique de raison (ou facteur) $\sqrt{2}$, soit 1.4, où chaque nombre entier est égal au précédent multiplié par 1.4 et non par 2.

Par 1/3 de stop. En gras, par bonds de 1 stop.

1	1.12	1.26	**1.4**	1.6	1.8	**2**	2.24	2.5	**2.8**	3.2	3.6
4	4.5	5	**5.6**	6.3	7	**8**	9	10	**11**	13	14.2
16	18	20	**22**	25	29	**32**	36	40	**45**	51	57

Les densités de filtres.

Elles sont données en valeurs logarithmiques, 0.00 étant la transparence totale.
Par 1/3 stops, en gras par stops entiers

0.00	0.10	0.20	**0.30**	0.40	0.50	**0.60**	0.70	0.80	**0.90**
1.00	1.10	**1.20**	1.30	1.40	**1.50**	1.60	1.70	**1.80**	1.90

La même échelle est utilisée dès que le besoin se fait sentir d'utiliser une échelle logarithmique. Elle est parfois replacée par une échelle en stops ou en EV.

L'opacité ou coefficients de filtre

Echelle en valeurs géométrique, semblable à l'échelle ASA.
Ces valeurs sont utilisées comme coefficient multiplicateur : avec un filtre de coefficient 8, il faut multiplier le temps de pose par 8 ou ouvrir de 3 stop.

1	1.25	1.60	**2**	2.5	3.2	**4**	5	6.4	**8**
10	12.5	**16**	20	25	**32**	40	50	**64**	80

La transmission.

C'est l'inverse de l'opacité. Exemple : un coefficient de 8 donne un transmission de 1/8 soit 0.125. Il s'utilise comme un coefficient diviseur.

1	0.80	0.64	**0.5**	0.40	0.32	**0.25**	0.20	0.160	**0.125**
0.100	0.080	**0.064**	0.050	0.040	**0.032**	0.025	0.020	**0.016**	0.012

Les pourcentages :

Ils sont utilisés pour estimer la réflexion (le gris neutre à une réflexion de 18%), la transmission, les valeurs du signal sur le waveform, etc. Ce sont des valeurs relatives.
Par 1/3 de stop. En gras, par stop entier.

100%	80%	64%	**50%**	40%	32%	**25%**	20%	16%	**12.5%**
10%	8%	**6.25%**	5%	4%	**3.12%**	2.5%	2%	**1.56%**	1.2%

Tableau des unités photométriques :

Grandeur	Unité SI	Symbole	Notes
Quantité de lumière	lumen/seconde	lm/s	le lumen seconde est parfois appelé *talbot* dans les pays anglo-saxons
Flux lumineux	lumen ou candela stéradian	lm	appelé parfois *puissance lumineuse*
Intensité lumineuse	candela (ou lumen par stéradian)	cd	c'est l'**unité de base**
Luminance	candela par mètre carré	cd/m^2	appelée parfois *brillance*
Éclairement	lux (ou lumen par mètre carré)	lx	il s'agit du flux lumineux reçu par une surface
Exitance	lumen par mètre carré	lm/m^2	même dimension que l'éclairement mais il s'agit du flux lumineux émis par une surface
Efficacité lumineuse	lumens par watt	lm/W	le maximum possible est 683

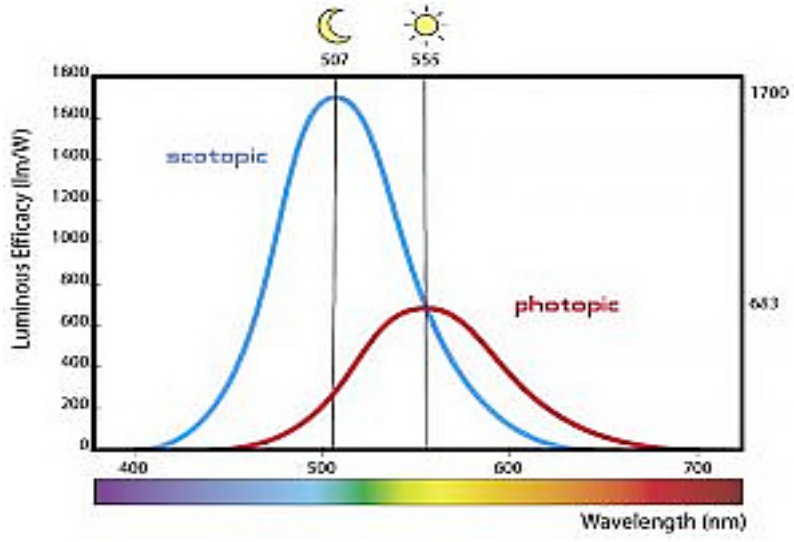
Certaines cellules ne donnent que des informations en lux. On les appelle de luxmètres. Elles sont généralement réservées à des applications scientifiques. Il est quand même possible de les utiliser en prise de vue, sachant qu'avec un éclairement de 2000 lux, on obtient une exposition correcte en affichant un diaphragme de 4 pour une sensibilité de 100 ISO à 24 i/s.
Ces unités sont à la base données selon une échelle linéaire. Pour des applications photographiques, on utilise pour ces unités selon une échelle géométrique, semblable à l'échelle ASA.

Mécanismes de la vision.

Pour rappel :

La rétine de l'œil est tapissée de cellules sensibles à la lumière : les cônes et le bâtonnets.
Les cônes distinguent les couleurs et cessent de fonctionner en deçà d'un seuil de lumière. C'est la vision "phototique".
Trois types de cônes : sensibles au bleu, au vert et au rouge (analyse trichrome).
Ils permettent de distinguer les couleurs et grossièrement les formes dans un angle de +/- 45°. Ce n'est qu'au centre que l'on distingue les détails avec précision, dans un angle de +/- 3° (la fovéa). En conséquence, le regard n'enveloppe pas d'un seul coup les formes (d'un paysage, d'un tableau), mais procède par balayage, par analyses successives de détails.

Les bâtonnets tapissent surtout la périphérie de la rétine. Ils ne distinguent pas les couleurs, ont une sensibilité chromatique décalée vers les bleus - verts par rapport aux cônes, sont nettement plus sensibles, distinguent les formes au centre et seulement le mouvement dans un angle de près de 180°. Ils prennent le relais des cônes en vision nocturne, dite vision "scotopique".



La vision est, comme tous nos sens, une sensation. Comme le son, la vision ne réagit pas proportionnellement à l'excitation, mais comme le logarithme de l'excitation. C'est la raison pour laquelle on remplace le plus souvent possibles les valeurs linéaires (proportionnelles aux luminations) par de valeurs logarithmiques (une dynamique de 1 à 500 par dynamique de 9 stops, par exemple), ce qui évite de travailler avec des échelles géométriques

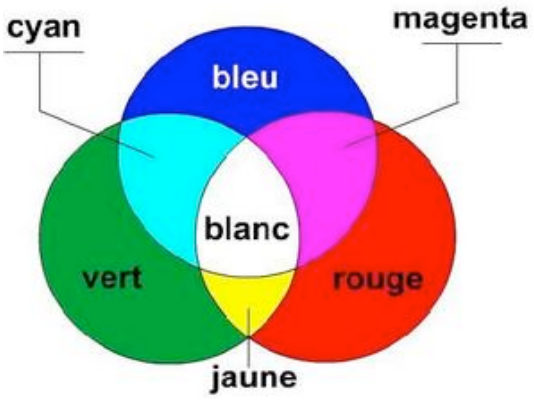
La rétine n'est pas un écran plat mais de forme ovoïde. Les images qui y sont projetées sont donc totalement anamorphosées (déformées). Le cerveau les corrige.
La vision n'est pas une faculté acquise, elle relève d'un apprentissage. Le nouveau-né ne différencie que clarté et pénombre. La reconnaissance (l'identification) des

formes et des couleurs relève d'un long apprentissage qui fait intervenir aussi le toucher, l'ouïe et la parole.
Dans notre cerveau, il n'y a pas d'images (pas plus que de sons, d'odeurs, de chaud, de froid, de douleurs). Pourtant nous VOYONS. C'est le cerveau qui « construit » cette sensation à partir de stimuli neurobiologiques, qui les « interprète ». Seul les sciences cognitives et les neurosciences peuvent expliquer ces phénomènes. Retenons ici que la vision n'est pas « mécanique » comme un procédé photographique ou comme un logiciel qui transforme des nombres binaires en image analogique. La conséquence en est qu'une valeur lumineuse mesurée ne correspond pas nécessairement à une sensation équivalente.
Heureusement : cela nous permet de « voir » un paysage très contrasté à partir d'une photo qui ne nous propose qu'une gamme de gris moyens (dynamique de +/- 4 à 5 stop), alors qu'elle « représente » une dynamique de 10 stop, voire beaucoup plus.
Autre conséquence : une valeur mesurée (un gris neutre par exemple) peut apparaître plus clair ou plus foncé selon qu'il est environné de noir ou de blanc. Idem pour les couleurs. Dans des cas de contraste extrêmes, des éléments très lumineux dans un ensembles globalement sombre par exemple, l'œil ne percevra plus de détails dans les parties les plus sombres. Ce sont des effets de contraste local.

Les couleurs n'existent pas en tant que telles dans la nature, où il n'y a que des rayonnements énergétiques (des photons) de longueur d'onde diverses (pour le visible, entre +/- 400 et 700 nm). C'est nous qui en faisons des couleurs. Nous ne voyons pas le rayonnement Gamma, X, ultra violet, infrarouge, micro ondes…mais nous en ressentons les effets.
Il n'existe pas de couleurs invisibles, puisque c'est nous qui "fabriquons" des couleurs là ou il n'y a qu'énergie (des photons).

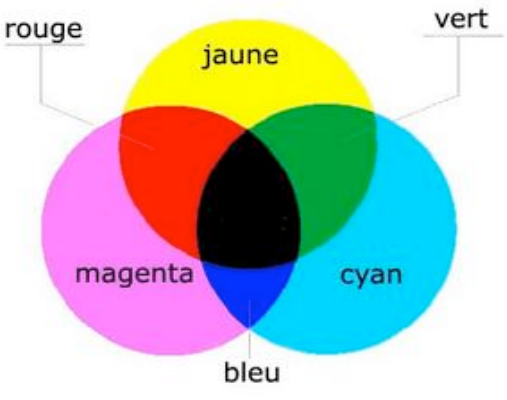
Non, toutes les couleurs ne sont pas dans l'arc-en-ciel, mais seulement les couleurs dites « pures ». Pas les gris, pas les couleurs mélangées et pas le magenta !
Le magenta est une couleur complémentaire « inventée » pour la bonne cause (pour que la trichromie fonctionne au mieux), composée de rouge et de bleu.

Il y a deux types d'analyse trichrome : additive et soustractive :



composition des additions de couleurs fournies par des photophores

système RVB

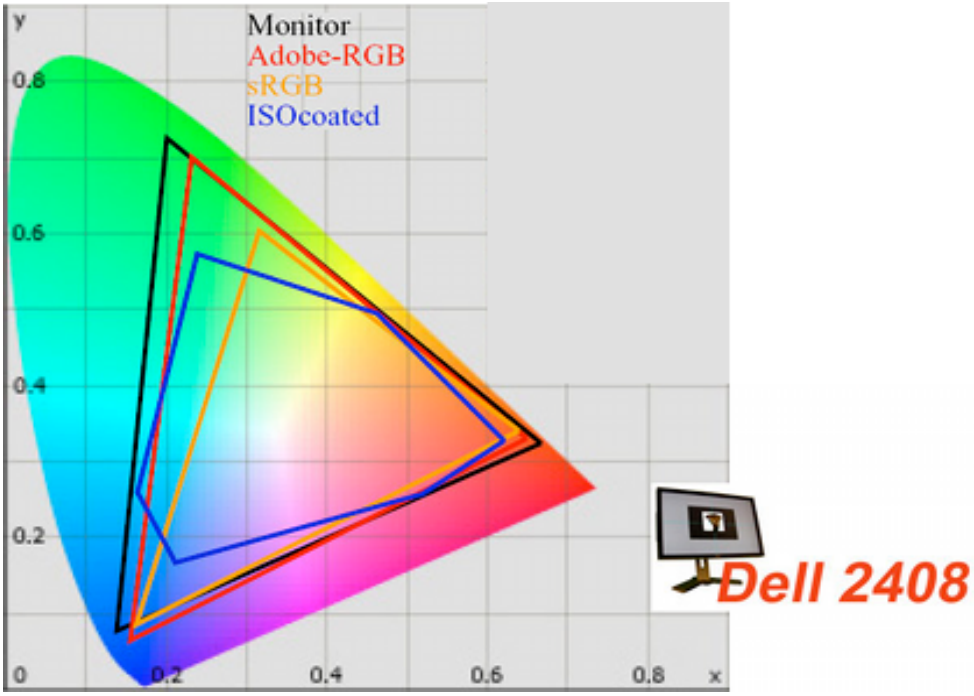


composition des soustractions de couleur par filtrages successifs de la lumière blanche

système CMJ

La vision, la vidéo et les procédés d'imprimerie grand format (affiches) sont additifs.
Les imprimantes sont soustractives, en quadrichromie généralement (YMC + noir).
L'image argentique couleur est soustractive.
Le diagramme de la CIE permet de localiser graphiquement et de quantifier sur un espace colorimétrique, toutes les couleurs pures visibles, de la saturation maximale à la désaturation totale (le blanc) + le magenta. Il est donc plus riche que l'arc-en-ciel.

Aucun système de reproduction des couleurs ne couvre un espace colorimétrique suffisant pour représenter la totalité des couleurs que nous pouvons percevoir : il ne peut que se construire à partir de trois (ou plus) couleurs de sélection (les primaires), ce qui détermine un triangle à l'intérieur du diagramme de la CIE où tous les mélanges sont possibles, mais exclut toutes les couleurs pures (saturées) et les mélanges de couleurs qui sont à l'extérieur de ce triangle.



L'image argentique reste (provisoirement) le procédé le plus riche du point de vue du rendu des couleurs. Il a en outre l'avantage d'être très peu tributaire des conditions de projection (conditions standardisées internationalement : 250 lux à l'écran pour un projecteur tournant à vide, lampe xénon). En numérique par contre, les couleurs et la dynamique peuvent-être sérieusement dénaturées par les écrans et/ou les projeteurs.

La notion de couleurs « justes », quel que soit le procédé considéré, est plus que discutable.

Les couleurs « chair », le ciel bleu et la verdure sont les seules qui nous permettent de nous faire une idée subjective de la « justesse » des couleurs.

Paul Kowaliski, ingénieur chez KODAK France *(Théorie photographique appliquée, Masson 1972)* a procédé à une expérience intéressante : il a proposé plusieurs

épreuves différemment étalonnées d'une image représentant un personnage dans un environnement verdoyant sur fond de ciel bleu à un public « représentatif », avec comme questions : laquelle préférez-vous (1), laquelle vous semble la plus proche de la réalité (2). Dans le lot des différents tirages, une seule (3) était, selon les mesures faites au spectrophotomètre, au plus proche de la réalité.
Un accord très large se faisait sur le choix du tirage préféré (1) et sur le tirage estimé le plus proche de la réalité (2), différent du précédant.
Aucune des tirages choisis ne correspondaient au tirage effectivement très proche de la réalité (3) !
Il en a déduit trois notions : couleurs préférées (1), couleurs de mémoires (2) et couleurs +/- « justes » («3), toutes différentes les unes des autres.
Il est aussi apparu que les couleurs préférées dépendent de l'environnement sociologique et culturel.

Par ailleurs, l'œil ne réagit pas de manière strictement homogène aux stimuli lumineux.
L'œil a tendance à tasser les extrêmes (très hautes et très basses lumières), à les "compresser".
- À des haut niveaux de lumière (plein jour lumineux - vision photopique), il discerne le plus grand nombre de couleurs et encaisse les dynamiques les plus élevées.
À ces niveaux, une température de couleur de 5600°K crée une sensation de confort visuel.
- Le crépuscule a souvent l'air gris, terne, froid. L'œil perçoit moins bien les détails, les couleurs, encaisse moins de dynamique et on éprouverait une sensation de confort si la température de couleur était plus basse (vers les 3500 à, 4000°K). Malheureusement, elle est souvent plus élevée. D'où cette sensation de « jour triste » (froid) que j'ai évoqué.
- Le niveau lumineux d'un intérieur soir confortablement éclairé est de l'ordre de 50 à 150 lux. Le confort de vision est atteint avec une température encore plus basse (2500 à 2900°K, lampes de ménage). Les couleurs semblent moins saturées, ont perd des détails dans les zones d'ombres. Le tube fluo lumière du jour de la cuisine donne un éclairage sinistre (trop froid).
- Le niveau de projection (250 lux) correspond à peu près à une fin de jour gris un peu triste. Paradoxalement, on n'y éprouve pas cette sensation d'inconfort. Les paramètres sensitométriques de l'image projetée nous y aide.
- En vision scotopique (nocturne), on ne discerne plus les couleurs, on encaisse encore moins de dynamique, on ne perçoit plus les détails.

Si photographier ou filmer consiste à montrer comme on voit, il faudrait en toute logique modifier les paramètres de nos machines à faire des images selon les niveaux lumineux dans la réalité, puisque ceux-ci modifient les paramètres de notre vision.
C'est une option tout à fait défendable.

Récapitulatif.

1° Aucun système d'enregistrement des images n'est capable de reproduire en projection ou sur papier la totalité de la dynamique que nous pouvons percevoir dans le réel (11 stop et plus), quand bien même la caméra le pourrait : il faudra bien à l'arrivée se contenter au pire d'une image dont la dynamique ne dépasse pas 2 stop

(le journal), au mieux 7 à 8, voire 10 stops (une projection numérique très performante en termes quantitatifs).
Le fabricant va donc devoir, pour compenser cette pauvreté en termes de dynamique, augmenter la sensation de contraste, et augmenter la saturation des couleurs (beaucoup trop chez le fabricant de téléviseurs).
(Voir plus loin : "Le Gamma" page 21 et "Sensitométrie et Colorimétrie" page 56)

Notes :
1° La positive Eastman Vision monte jusqu'à 14 stops, mais étant donné le niveau de projection (250 lux et le tassement de la dynamique perceptible par l'œil qui en résulte), cette incroyable dynamique (richesse) ne peut pas être exploitée en projection.
2° Aucun système d'enregistrement d'images n'est capable de reproduire la totalité des nuances colorées que nous pouvons percevoir. Pour compenser cela, le fabricant va augmenter la saturation des couleurs.
3° Quand bien même le critère d'appréciation qualitatif est fondamentalement (*« il faut que l'image ressemble au modèle* »), il ne suffit pas que l'on se contente d'une «ressemblance» mesurée pour donner une image satisfaisante, il faut aussi qu'elle soit ressentie comme telle, et ça, n'est mesurable que statistiquement : trop de facteurs subjectifs.

La chaîne de fabrication argentique.

Principes de base

Il existe des pellicules dites inversibles (diapositives), qui produisent directement des images positives. Cela veut dire : les valeurs claires dans le réel produisent des valeurs claires sur la pellicule, les sombres du sombre, le rouge du rouge, etc. Elles sont surtout destinées aux amateurs.

Toutes les autres produisent des images inverses aux luminations et aux couleurs : Le clair produit du sombre, le sombre su clair, le rouge du cyan, etc.
Certaines sont dites négatives, d'autres positives, selon l'usage auquel elles sont destinées dans la chaîne de fabrication.
C'est en copiant l'une sur l'autre (le négatif sur le positif) que l'on obtient l'image positive, celle ou les faibles luminations de la scène produisent des valeurs sombres et des fortes luminations des valeurs claire sur l'image finale.

Les pellicules de prise de vue dites négatives et ont un contraste peu élevé (restons en à ce terme plutôt subjectif pour l'instant). Elles ont pour but d'enregistrer une dynamique la plus large possible (8 à 9 stops dans les années 1950, 14 stops aujourd'hui). La gamme des sensibilités va en gros de 50 à 500 ASA. Certaines sont équilibrées pour la lumière du jour, d'autres pour la lumière artificielle.

Les pellicules de projection sont dites positives. Leur sensibilité est peu élevée (3 à 6 ASA), le contraste élevé. Elles ont une dynamique ou latitude d'exposition plus réduite que les négatives de prise de vue, mais une dynamique plus importante en termes de densités produites par les luminations.

La copie du négatif sur le positif s'appelle le tirage.



Un négatif avec sa dominante rouge - orangée (le masque) qui se superpose aux couleurs.



Le positif qui en résulte après tirage et neutralisation du masque.

On ne tire jamais les copies d'exploitation (souvent plusieurs centaines) directement du négatif : il est trop précieux, il se détériorerait. Il faut en outre fournir des doubles du négatif original aux distributeurs étranger.

Dès que le montage est achevé, que l'étalonnage est jugé satisfaisant, on en fait une copie (on le tire) sur une pellicule intermédiaire dite « interpositif ». De celle ci, on fait une ou plusieurs copies sur une pellicule dite « internégatif ». On tire à partir ce facsimile du négatif original monté les copies d'exploitation. D'autres internégatifs sont éventuellement envoyés aux distributeurs étrangers pour que ceux-ci puissent tirer leurs copies d'exploitation. Le film que l'on voit en salle est à minima la troisième copie de l'original négatif

Les trucages se font sur de l'interpositif, ce qui multiplie le nombre de copies de l'original et peut entraîner une dégradation de l'image assez sensible (montée de voile, apparition de grain, altération du gamma, des couleurs, de la netteté).

Latitude d'exposition et latitude de pose.

La latitude d'exposition est la dynamique maximale des luminations, en stops, que l'on peut enregistrer sur un support.

La latitude de pose est la marge d'erreur tolérable lors de la prise de vues, exprimée en stops ou tiers de stops.

Pour qu'on puisse disposer de cette marge d'erreur à la prise de vue (latitude de pose), il faut que la dynamique du sujet que l'on veut enregistrer soit inférieure à la dynamique du procédé de prise de vues (latitude d'exposition), qu'il soit argentique ou numérique.

Voir en annexe : le développement des pellicules argentiques page 66).

Sensitométrie Argentique.

L'essai de Key Light consiste fondamentalement à enregistrer un sujet à plusieurs diaphragmes, au delà et en deçà de l'indice d'exposition préconisé par le fabricant, pour
1° vérifier si cet indice est bien le bon.
2° explorer les limites dans les hautes et basses lumières.
3° vérifier si ces caractéristiques se maintiennent tout au long de la chaîne de fabrication.
4° apprécier subjectivement la texture, les couleurs, le grain ou le bruit...
Cet essai nous donne des informations plus « sensibles » que scientifiques.

La sensitométrie est en quelque sorte la version de laboratoire de l'essai de Key Light. Il donne peu d'informations « sensibles », il donne surtout des informations mesurables. Il permet de confirmer ou d'infirmer les conclusions que l'on a tirées de l'essai de Key Light, de comprendre pourquoi on est confronté à tel phénomène, éventuellement comment y remédier. Il permet enfin d'identifier un problème dans la chaîne de fabrication, jusqu'à la projection.

Mise en œuvre des essais sensitométriques en argentique.

Au lieu d'enregistrer l'image d'un sujet quelconque (un paysage, un personnage, un charte et des éléments colorés, un intérieur…) on enregistre (ou imprime, expose) directement (par contact sur la pellicule) une bande composée d'une série de gris neutres (21 en général) allant de la transparence totale (densité 0.00) à un densité maximale de 10,5 stops (densité 3.15) directement sur le négatif.
Cette bande s'appelle le coin de Goldberg. C'est notre « sujet ».

RAPPELONS-NOUS QUE LES DENSITÉS SONT ICI L'EXPRESSION LOGARITHMIQUE DES LUMINATIONS !
Et que c'est une nécessité absolue : l'œil réagit comme le logarithme de l'excitation (la lumière, les luminations)

Le coin de Goldberg à pour but de faire rentrer dans le laboratoire les écarts de luminations que l'on peut rencontrer dans le réel, à l'intérieur d'une dynamique donnée (ici 10,5 stop), sensiblement plus large qu'une charte (4 stops 2/3). Elle pourrait l'être encore plus, selon les besoins. L'avantage du coin de Goldberg sur un sujet quelconque, c'est qu'on peut mesurer avec précision le logarithme des luminations (il n'y a d'ailleurs que ça à y voir), sans être troublé par le « sens » de l'image et sans interférence de la qualité de l'objectif ni du flair de la caméra.

Voici à quoi ressemble, schématiquement, un coin de Goldberg :



L'écart entre chaque plage est généralement de 0.15 (1/2 stop).
Cet écart est dit « constante de coin ».
La 11° plage représente en principe le gris neutre 18%, mais on peut aussi attribuer cette qualité de gris neutre 18 % à une autre plage.

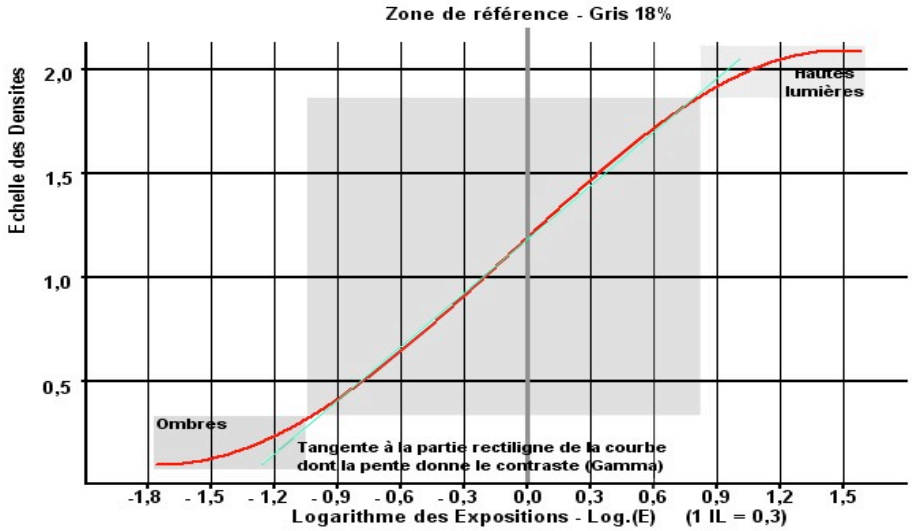
Cette bande permet en une seule impression (exposition) de soumettre le film à des luminations dont la dynamique (l'écart de luminations) couvre 10,5 stops, voire plus.

Après exposition du film à cette bande, on développe le film et on mesure avec un densitomètre (appareil qui permet de mesurer des densités sur de très petites surfaces) les différentes densités obtenues sur le négatif. On mesure ainsi avec précision comment le négatif réagit à ces différentes luminations.

On reporte les valeurs mesurées sur un graphique qui visualise la réaction de la pellicule à ces différentes luminations : le sensitogramme ou est visualisé la courbe sensitométrique (on dit aussi, la courbe de noircissement).

En ordonnées, les densités (le résultat), en abscisses, les luminations (l'excitation), en valeurs logarithmiques.

En voici un exemple :



Ici, la plage 11 est identifiée 0.00
Les auteurs de cette courbe ont choisi de chiffrer les plages à partir du gris neutre (0.00), en positif vers les hautes lumières, en négatif vers les basses lumières. C'est un peu plus compliqué à lire, mais pourquoi pas ?
Retenons que cette pellicule a été exposée à des luminations dont la dynamique est de 12 stops plutôt que 10,5, ce qui est déjà plus adapté aux pellicules modernes et aux caméras numériques performantes.
Cela ne change rien aux principes de base de la sensitométrie.

La dynamique de cette pellicule est au moins égale à 8 stops, 10 maximum si l'on utilise les extrêmes.
Faites le compte :
Soit de -1.2 à + 1.2 = 2.4 : 0.30 = 8 stops, si on ne souhaite pas utiliser les extrêmes (la partie arrondie de la courbe dans les hautes lumières, dite l'épaule et la partie arrondie de la courbe dans les basses lumières, dite le pied).
Soit de -1.5 à + 1.5 = 3 : 0.30 = 10 stops, si on veux exploiter les extrêmes.

Il est dangereux d'exploiter trop le pied, cela engendre une montée de voile.
Le voile : il s'agit de la densité de la matière même du support là ou la pellicule réagit à peine à la lumière ou plus du tout.
En numérique, on parle de souffle ou de bruit numérique.

Si l'on voulait explorer la totalité de la dynamique de l'ALEXA ou des dernières EASTMANCOLORS, il faudrait un coin de Goldberg de 14 stops au moins.
Certains vont même jusqu'à proposer une dynamique de 17 stop en prise de vue, et on pourrait aller plus loin. Ça peut être utile dans certaines applications scientifiques. Mais, hormis ce cas particulier, pourquoi faire des images qui n'ont plus aucun rapport avec la perception visuelle dont la dynamique est sensiblement inférieure à 17 stops ? Tout au plus peut-on escompter un effet d'étrangeté, où fortes pénombres et clarté sont neutralisées. Une sorte "d'aplatissement" des contrastes, comme on peut aplatir les volumes à l'aide d'une longue focale.

Revenons à cette courbe sensitométrique. Deux choses intéressantes apparaissent.

1° La partie rectiligne de la courbe est assez longue.
C'est la zone pour laquelle la pellicule réagit proportionnellement aux logarithmes des luminations.

2° Pour les très basses et les très hautes lumières, on voit que cette réaction n'est plus proportionnelle. Elle tend graduellement vers ZERO ou MAXIMUM réaction.
Est-ce un défaut ?
Non, c'est une qualité !

La pellicule argentique produit naturellement une compression des très hautes et très basses lumières, ce qui correspond à notre système de vision et étend la sensibilité dans ces zones critiques. Les images ainsi produites proposent des noirs et des blancs qui glissent tout en douceur vers le noir et le blanc absolu, alors qu'une caméra vidéo de base, analogique comme numérique, butte sur la limite radicale et brutale du 0.3 volt pour les noirs et du 1 volt pour les blancs.

Note : le seuil maximal des blancs est difficile à situer en argentique. Dans la réalité, la pellicule continue de réagir même à de très fortes surexpositions, mais la réaction s'inverse progressivement. Passé un seuil, elle produit une image positive. On parle de solarisation. Les effets de solarisation les plus flagrants s'obtiennent au tirage.

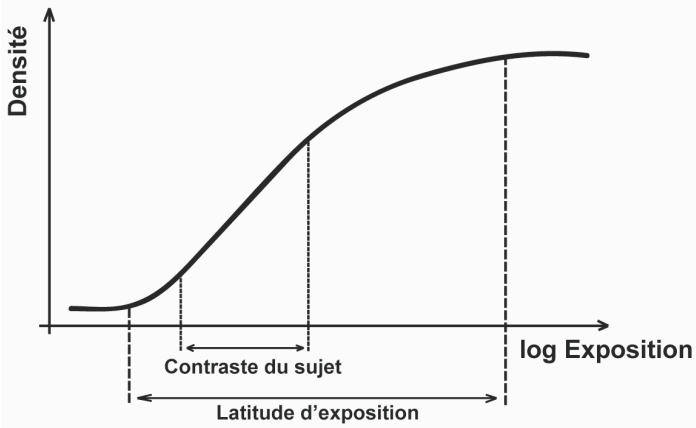


Positif normal.



Positif solarisé.

On appelle « pied » la compression dans les basses lumières, « épaule » la compression dans les hautes lumières.
Notre courbe de référence s'arrête là ou on (les fabricants, les utilisateurs) estime que ça ne vaut pas la peine de la prolonger, mais on pourrait le faire pour visualiser cette solarisation.
Si les fabricants nous proposent des latitudes d'exposition de 14 stops, c'est pour que nous puissions disposer d'une latitude de pose, même dans les cas des plus extrêmes contrastes.
Mais à trop vouloir augmenter la dynamique, on perd cette qualité (la compression naturelle de l'argentique), car la dynamique dépasse alors celle qui est nécessaire pour produire un bon positif. On peut le dire autrement : la latitude d'exposition est tellement grande que la latitude de pose fantastique dont on dispose permet d'exposer le sujet entièrement dans la partie rectiligne, avec pour résultat un effet « vidéo de base » (sensation d'un contraste trop élevé).
Exemple :



Dans la pratique, la latitude de pose, s'il y en a une, n'est utilisable qu'en photographie. En cinéma, le faire aboutirait à faire varier la sensation de contraste de plan à plan, selon qu'on a d'exploité la douceur du pied ou que l'on a situé les informations utiles uniquement dans la partie rectiligne de la courbe. On considère en général que la partie utile de la courbe (là ou on ne ressent plus le voile) commence à 0.10 / 0.20 au dessus du voile (mesuré sur l'ordonnée). L'expérience nous a appris qu'au-delà d'une variation d'exposition de +/- un tiers de stop, la différence de sensation de contraste est irrattrapable à l'étalonnage.

Ce n'est pas le cas en photographie, où l'on peut faire le tirage sur des papiers de contrastes différents (de gamma différents en fait) et où la question de la "continuité photographique" ne se pose pas dans les mêmes termes.

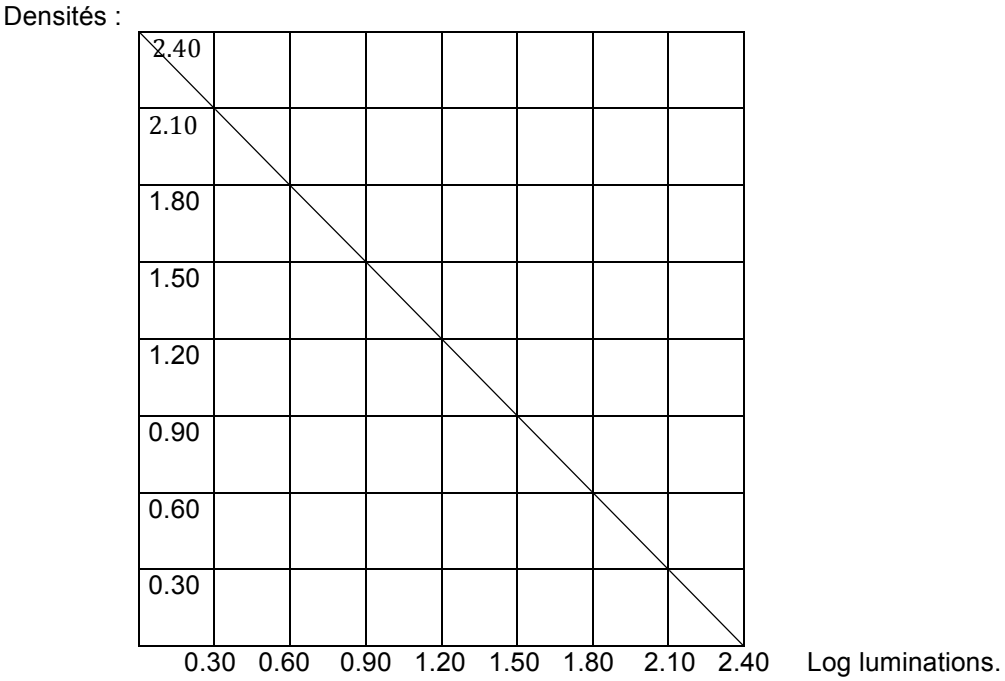
Le Gamma.

On sait que pour obtenir une image satisfaisante (qui "ressemble au modèle"), il faut tenir compte des mécanismes de la vision et des conditions d'observations des images. En particulier, qu'il faut augmenter le contraste pour avoir une sensation de "contraste normal" (*voir : "Mécanismes de la Vision" page 11*).
La question qui se pose est de combien. Il arrive très vite un moment ou de termes tel que *"un peu plus, un peu moins"* ne suffisent plus. Cela est vrai tant pour le fabricant que pour le laboratoire et pour l'utilisateur averti.

Le GAMMA permet de chiffrer objectivement cette augmentation souhaitable du contraste, tout au long de la chaîne de fabrication jusqu'à l'image finale. Il permet aussi de s'écarter volontairement de ce qui est généralement considéré comme un contraste "normal".

Note : on ne peut pas vraiment "normaliser la norme". C'est une notion subjective qui dépend du fabricant, de l'utilisateur, des acheteurs, de variables socioculturelles, du goût du jour et des intentions artistiques des auteurs.

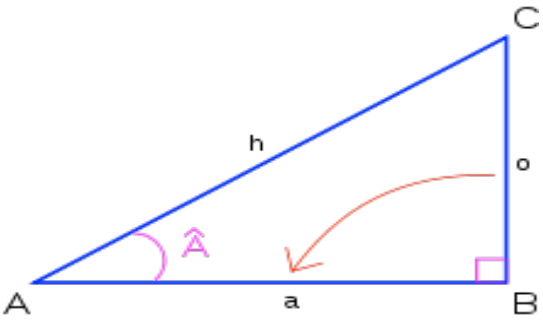
Si une pellicule (ici une inversible) donnait une image identique au modèle (le coin de Goldberg, la scène), on obtiendrait ceci :



Une image déplorablement plate, molle, autant en termes de contraste que de saturation.

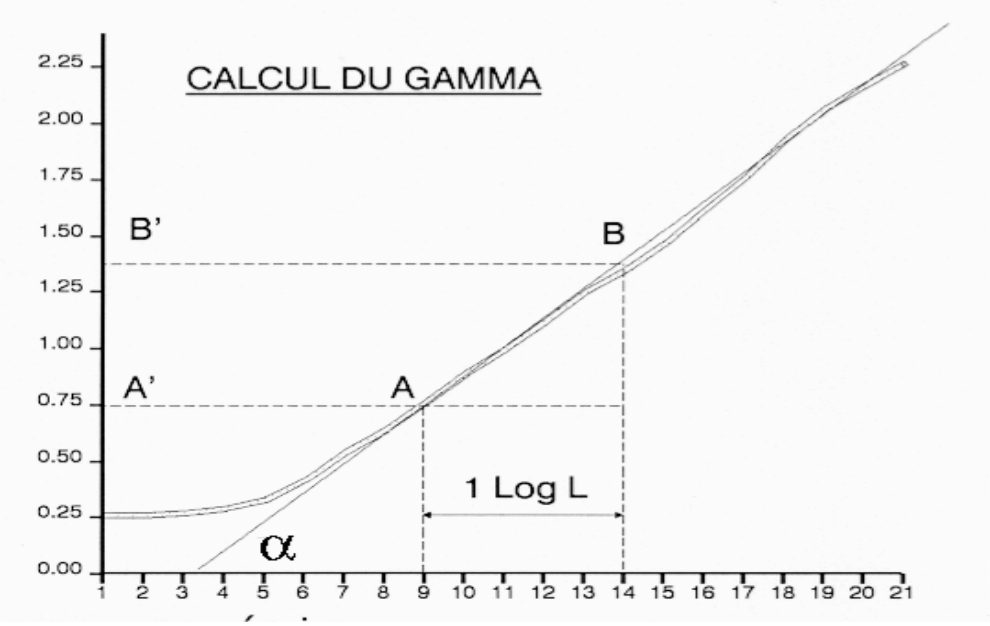
Il y aurait identité absolue entre le logarithme des luminations en abscisse (donc entre les densités du coin de Goldberg) et les densités sur la pellicule en ordonnée.
La partie rectiligne formerait un angle de 45° avec l'abscisse (les luminations).
La tangente de 45° = **1**

Pour mémoire : dans un triangle rectangle, la tangente d'un angle Â opposé à l'angle droit = le coté opposé à Â (o) divisé par le côté adjacent (a)



Tan Â = BC : AB

<u>En argentique, le GAMMA est la tangente de l'angle α formé par la partie rectiligne de la courbe sensitométrique (l'hypoténuse) avec l'abscisse</u>.



L'avantage du gamma dans une chaine de fabrication (dont le principe de base est que l'on va copier successivement des images sur des pellicules de caractéristiques sensitométriques et de fonctions différentes) est <u>qu'il suffit de multiplier les différents gammas de la chaine pour connaître le gamma de l'image finale.</u>

<u>Attention :</u> des effets de copies successives, (négatif, interpositif, internégatif, positif) ainsi que les conditions techniques des ces copies (par contact, optique, en milieu

humide) peuvent influer sur ce gamma résultant de la multiplication de gammas, généralement dans le sens d'une légère augmentation.

Quelques valeurs du gamma :

Comme il a été indiqué plus haut *(Mécanismes de la vision, Récapitulatif page 14)*, il est nécessaire que l'image finale à l'écran soit plus « contrastée » que le modèle pour produire une sensation de contraste « juste ». Autrement dit, que le gamma de l'image finale soit supérieur à **1**.

On s'accorde en général sur un gamma image finale de **1.4** ou plus

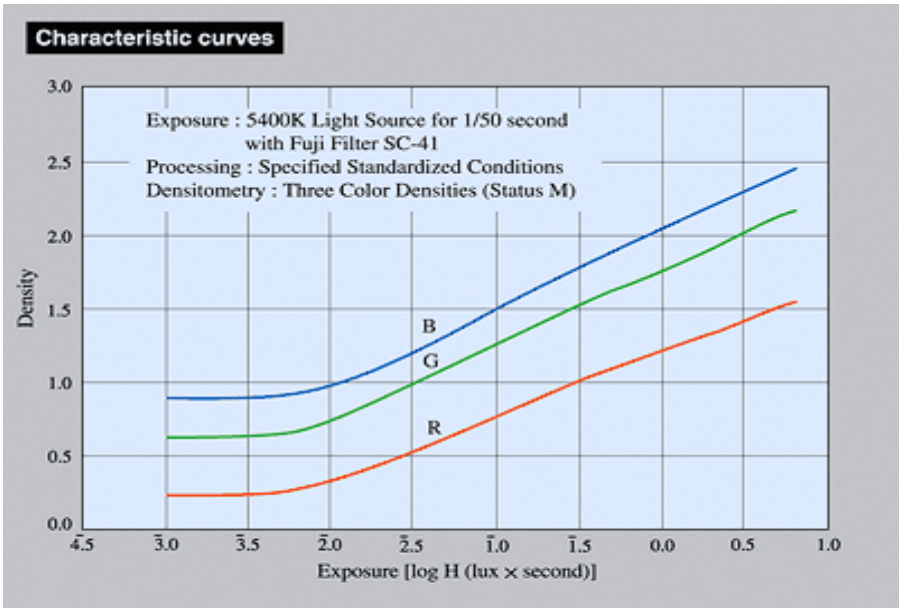
Le négatif de prise de vue doit pouvoir enregistrer la dynamique la plus large possible. Il faut donc qu'il soit inférieur à 1
Le gamma d'un négatif de prise de vue se situe entre **0.6** et **0.7**.

Il ne reste plus qu'à trouver le Gamma du positif.

Si le gamma négatif (0.65) X gamma positif = gamma image finale (1.4 ou plus), le gamma positif = gamma image finale **:** gamma positif soit 1.4 **:** 0.65 = 2.15 au minimum.
Le gamma du positif est de l'ordre de **2.15** à **2.4**

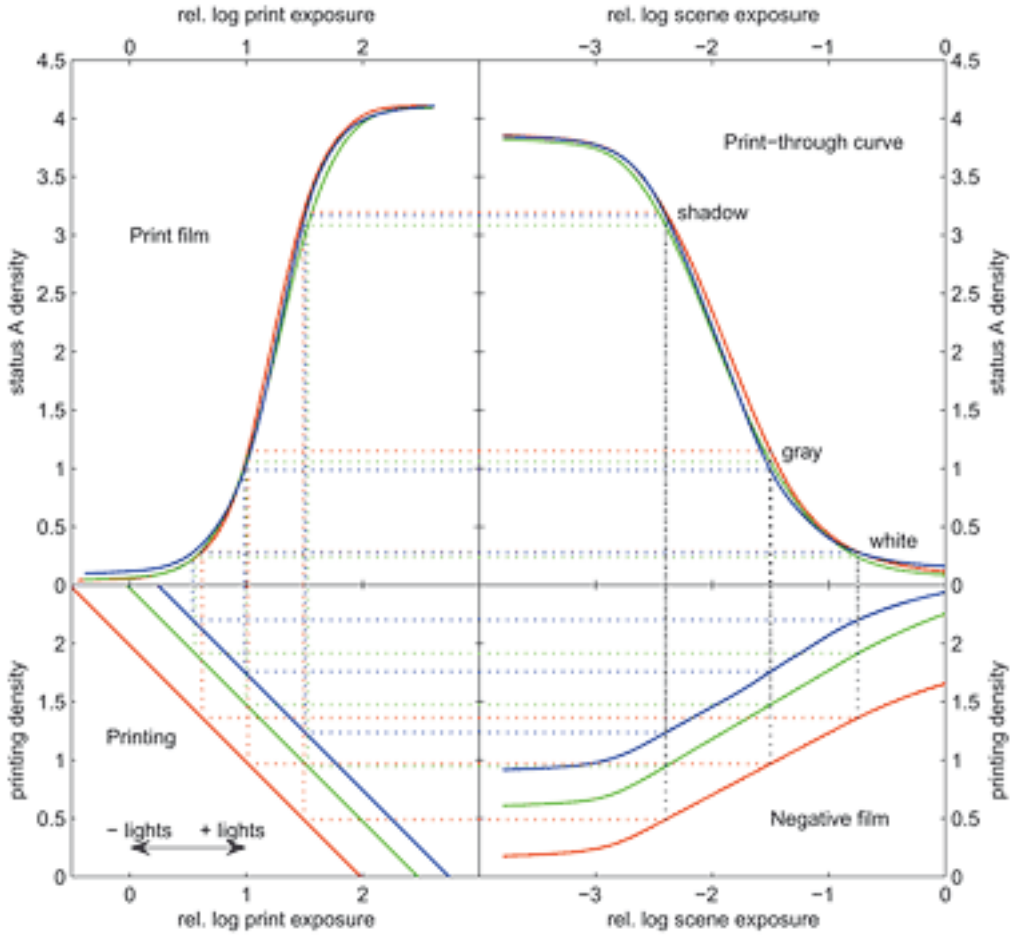
Le gamma des interpositifs et internégatifs ne peuvent pas modifier le gamma final. Il est donc théoriquement de 1. En fait, légèrement inférieur pour contrecarrer une augmentation du Gamma par effet de copie.
Le gamma des interpositifs et internégatifs est de l'ordre de **0.9.**

Le gamma de la pellicule qui nous a servi de référence jusqu'à présent est, mesuré au rapporteur d'angle, de 0.84. C'est probablement un internégatif ou interpositif assez doux, noir et blanc.
Pour la couleur, il y a forcément trois courbes :



Ce sont les courbes d'une pellicule négative de prise de vue Fuji.
Le décalage vertical des trois courbes n'indique une dominante colorée ni une différence de sensibilité, quand bien même une lumination (par exemple 1.5) produit trois densités différentes (0.5 - 1.0 - 1.75). Ce décalage et dû au filtre orangé qui corrige les imperfections de sensibilité spectrale des trois couches, caractéristique des négatifs couleur ainsi que des interpositifs et internégatifs. Ces imperfections sont dues au fait que les filtres de sélection R, V, B incorporées dans la pellicule ne sont pas suffisamment sélectifs. On appelle ce filtre orangé un « masque »
Bizarrement, on ne parle jamais de masque en vidéo, alors que les capteurs sont eux aussi recouverts de filtre R V B, sans quoi la sélection des couleurs ne pourrait pas se réaliser correctement. Ces filtres sont eux aussi être imparfaits.

Un diagramme de Jones permet de visualiser le report de l'image du négatif sur une pellicule positive et l'image qui en résulte. À chaque étape, les densités sont mesurables avec précision. Il s'agit de pellicules couleurs, nous aurons donc trois courbes RVB à chaque étape.



En bas à droite, les courbes RVB du négatif.
En bas à gauche, trois droites à 45°. Ces droites servent à projeter l'image négative sur les trois courbes d'une pellicule positive de projection. Le décalage latéral de ces trois droites correspond aux valeurs d'étalonnage qui permet de neutraliser les différences de densité des courbes RVB du négatif.

En haut à gauche, les trois courbes de la pellicule positive. Elles se superposent nécessairement, sans quoi elles introduiraient une dominante.
En haut à droite, l'image qui en résulte.
Remarquons que l'épaule du négatif est, à ce niveau élevé de luminations, quasi rectiligne. Cela produit pourtant une compression des blancs extrêmes, grâce au report de cette partie du négatif sur le pied de la courbe positive, ce qui engendre une compression de ces mêmes blancs sur l'image résultante.
Autrement dit, les qualités du négatif qui est au début de la chaine de fabrication des images, ne déterminent pas à elles seules les qualités de l'image finale.
C'est tout l'intérêt du diagramme de Jones d'en faire la démonstration.

Analysons ce diagramme.

Les courbes du négatif se prolongent bien au delà du diagramme. Seul ce qui « rentre » dans le positif y figure, avec une petite réserve.
La dynamique utilisable, étant donné les caractéristiques du positif, est d'au moins 3.00, soit 10 stops.
La dynamique propre au négatif est visiblement supérieure. On ne sait pas de combien. Il y a donc latitude de pose possible, mais pas dans le sens d'une sous exposition : on pourrait corriger à l'étalonnage, mais les basses lumières se situeraient entièrement dans les pieds des trois courbes, avec pour effet des pertes de détails et de la grisaille plutôt que des noir.
Une surexposition serait envisageable, mais au détriment de la richesse du nuancier des basses lumières.

Le transfert est idéal : toutes les valeurs « intéressantes » du négatif, y compris la douceur du pied et la le début de la compression de blancs « rentre » dans le positif.
Le positif accepte une dynamique de luminations de +/- 2.0 en densité, soit 6,5 stops. Cela est du à une partie rectiligne très raide (un gamma élevé de l'ordre de 2,4). Mais la dynamique des densités est très élevée, au delà de 4.00.

Le résultat de la combinaison de ces courbes et de ces gammas donne une image dont la dynamique est de l'ordre de 2, 5 (8 stops). Il faut tenir compte qu'étant donné le niveau de projection (250 lux), l'œil ne discerne plus de détails du tout au delà d'un densité de 3,5

En conclusion, il est illusoire de vouloir faire rentrer une dynamique impressionnante (14 stops) dans cette « boîte » trop petite que constituent les possibilités de notre système de vision dans les conditions d'observation d'une bonne salle équipée d'un bon projecteur. On pourrait éventuellement enregistrer l'image sur un négatif extrêmement doux (gamma de 0,5 ou plus bas encore), mais cela aurait pour effet de proposer des images trop éloignées du modèle : on les trouverait trop « molles ».

Rien n'exclut pour autant de faire des images qui s'éloignent de cette idée de fidélité réaliste.
Il nous reste donc à envisager les possibilités de manipulation de la chaîne de fabrication argentique pour y arriver.

Quelques manipulations possibles.

- Exposer plus que la norme pour obtenir des images plus contrastées.

- Exposer moins pour produire des images un peu plus douces. S'y ajoute un effet de texture, difficile à contrôler mais qui est recherché dans ce cas : l'apparition du voile.

- Flasher le négatif : voiler légèrement et uniformément le négatif (+ 0.10/ + 0.20 au dessus du voile) adoucit l'ensemble de l'image et surtout les basses lumières dont la sensibilité augmente un peu (1/3 à 1/2 stop). Ce voile peut être coloré.
- On peut flasher à outrance : il ne reste que des gris moyens, des gris clair et des blancs.
Aucun procédé numérique (étalonnage ou réglage des paramètres de la caméra) ne peut rivaliser avec le flashage, qui peut se faire à la prise de vue ou au laboratoire : non seulement il agit sur la texture de l'image mais aussi sur la lumière !

En noir et blanc :

- Sur développer pour augmenter sensiblement le gamma (sensation de contraste), forte augmentation de la sensibilité dans les hautes lumières, augmentation dérisoire dans les basses lumières.

- Sous développer pour diminuer le gamma, forte perte de sensibilité dans les hautes lumières, moindre dans les basses lumières

En couleur :

- Sur développer le négatif : léger gain de sensibilité, augmentation du grain, de la texture.

- Sous développer : moins de grain, un peu plus de douceur. Légère perte de sensibilité.

- Supprimer le bain de blanchiment = conserver l'image noir et blanc dans le négatif couleur : forte désaturation des couleurs, augmentation du gamma, obligation d'utiliser un indice d'exposition ASA plus élevé.
- Utiliser un positif d'exploitation bas contraste (dit TV print) développé sans blanchiment : désaturation nuancée des couleur sans augmentation du gamma. Exemple : L'Œuvre Au Noir d'André Delvaux.

- Développement dit argentique : diminuer de manière contrôlée la durée du bain de blanchiment. C'est une manière de nuancer à loisir le traitement précédent.

- Dupliquer le négatif sur un positif et l'utiliser comme interpositif : augmentation sensible du contraste et de la saturation, diminution de la palette chromatique.

- Dupliquer le positif sur un internégatif : même effet, moins prononcé.

- Dupliquer le positif sur un négatif de prise de vue : même effet, encore moins prononcé.

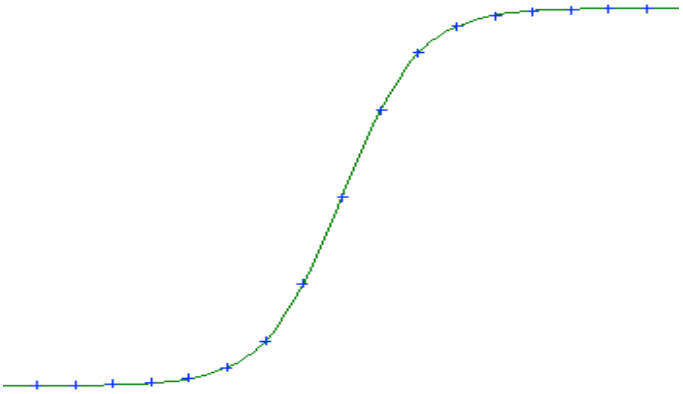
- Dupliquer le négatif sur trois interpositifs noirs et blanc, pour faire une sélection trichrome (procédé de tirage Technicolor). Gamma, couleurs et saturation sont alors manipulables à loisir. Exemples : Moby Dick de Huston et L'Argent de Bresson.

Ces manipulations (sauf le flashage et le travail de la texture) ne sont pas grand-chose en regard de ce qu'il est possible de faire en numérique.
Aucune de ces manipulations n'est envisageable sans un rigoureux suivi sensitométrique.

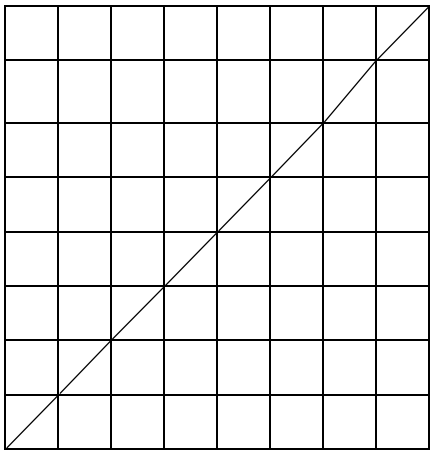
SENSITOMÉTRIE NUMÉRIQUE

Préambule.

Longtemps, on était convaincu que la partie utile de l'image argentique ne devait être enregistrée que sur la partie rectiligne de la courbe sensitométrique, seule capable de produire une image dont les densités sont proportionnelle aux log luminations. Une copie scientifiquement conforme au réel, une idée de haute fidélité de l'image.
En 1940, Lyod A. Jones, chercheur en psychophysique chez KODAK USA, mène une enquête auprès d'un vaste public témoin pour en déduire une courbe du meilleur rendu subjectif, sur base de tirages photographiques de gammas différents.
Il a obtenu une courbe de forme sigmoïde, dite courbe en "S"



Cette courbe est à mettre en relation avec les mécanismes de la vision qui ont tendance à compresser les luminations extrêmes et avec le fait que qu'une représentation photographique a une dynamique inférieure à la réalité : il faut compenser ce manque par une compression des extrêmes et une augmentation du contraste.
Fort heureusement, la compression des valeurs extrêmes est inhérente à l'image argentique, ainsi que le montre n'importe quel sensitogramme. Une heureuse coïncidence entre nécessités perceptives et réalités objectives.
Depuis lors, les fabricants de pellicules sont très attentifs à l'allure de l'épaule et du pied de leurs émulsions photographiques.



Il est étrange que la technologie vidéo se soit développée au départ en ignorant les principes développés par Loyd A. Jones, valables pour l'image en général.

Étrange qu'on ait si longtemps privilégié une réponse rectiligne aux log luminations, tel que ci-contre à gauche.
D'ou, la dureté des images vidéos de base.

Étrange aussi que la plupart des fabricants, hormis ARRIFFEX, ne nous donnent que des informations sensitométriques parcellaires, quand ils nous en donnent. Est-ce du au fait que l'image numérique n'a pas encore trouvé de repères stables (des

normes), ou est-ce parce que l'image numérique ne s'appuie pas assez sur la sensitométrie qu'elle manque de repères stables ?
Est-ce dû à une culture du secret ?

En argentiques, toutes ces informations étaient et sont encore largement diffusées par les fabricants.

Analogies et différences entre les procédés argentiques les procédés électroniques.

L'analyse trichrome

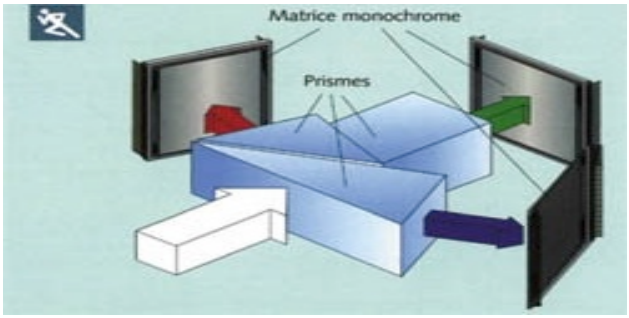
La totalité de la chaîne argentique couleur est soustractive.
La totalité de la chaîne vidéo couleur, qu'elle soit analogique ou numérique, est additive.
Cela n'a pas de conséquences déterminantes du point de vue sensitométrique mais mérite un petit détour.

La pellicule couleur : trois couches superposées sont respectivement sensibilisés au bleu, au vert et au rouge. Des filtres intercalés entre ces couches sélectionnent les couleurs.

Filtre anti U.V.	- Bloque les U.V.
Couche non chromatisée : enregistre les bleus	- Forme un colorant jaune lors du développement + une image noir et blanc.
Filtre jaune (bloque les bleus)	
Couche orthochromatique : enregistre les verts	- Forme un colorant magenta lors du développement + une image noir et blanc.
Filtre rouge (bloque les verts)	
Couche panchromatique : enregistre les rouges	- Forme un colorant cyan lors du développement + une image noir et blanc.
Support	Un bain spécifique, le bain de blanchiment, enlève les trois composantes noir et blanc des trois couches.
Couche antihalo	Cette couche antihalo disparaît lors du développement

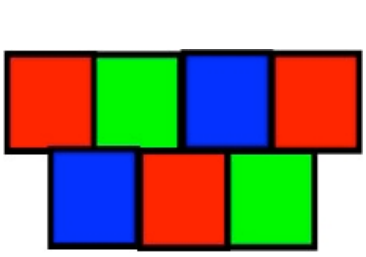
C'est par transparence, projection ou copie sur un support papier que l'on voit la totalité des couleurs. Un papier photographique procède de la même logique.
Cela semble très compliqué mais pas plus qu'un matriçage NTSC, PAL ou SECAM.

En vidéo.
Soit un prisme éclateur sélectionne et dirige trois faisceaux lumineux RVB vers trois tubes ou capteurs qui chacun enregistrent une des information couleur rouge, verte ou bleue. Solution devenue obsolète. Elle s'apparente au défunt procédé de prise de vues argentique Technicolor, procédé additif où dans la caméra, trois négatifs noir et blanc enregistraient séparément les informations RVB, grâce à un éclateur.

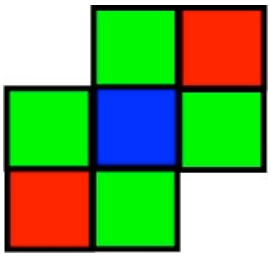


La sélection RVB est réalisée par des filtres dichroïques à même les surfaces de séparation des prismes qui composent l'éclateur. Ces filtres sont parfaits pour des rayons perpendiculaires à leurs surfaces. Ils le sont moins pour des rayons obliques. Cela entraine des dominantes sur les bords des images difficile à corriger électroniquement.

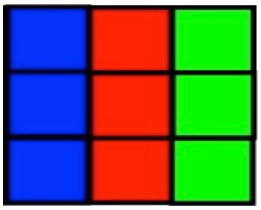
Soit il n'y a qu'un capteur. Les composantes couleur sont obtenues en plaçant un réseau de filtres de sélection RVB devant chaque photodiode du capteur, de sorte à ce que chaque photodiode n'enregistre qu'une seule information couleur.



Rockwell



Bayer

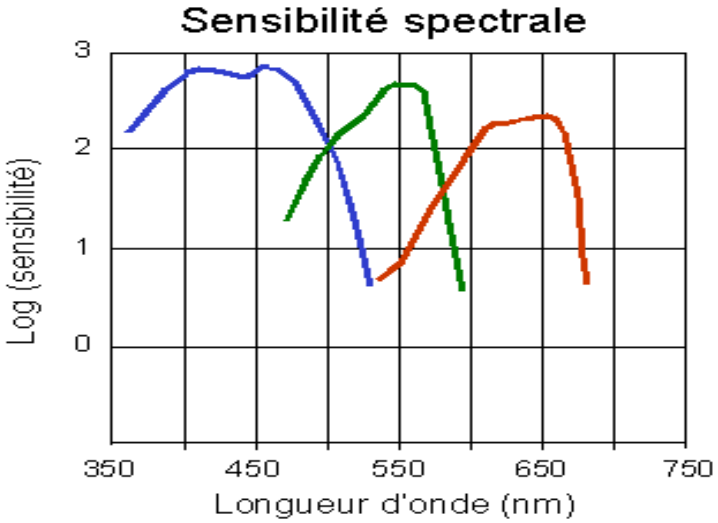


À colonnes

Les écrans procèdent d'une logique analogue : chaque pixel est composé de trois sous-pixels RVB, que l'on ne peut distinguer qu'en observant l'écran de près et à la loupe.

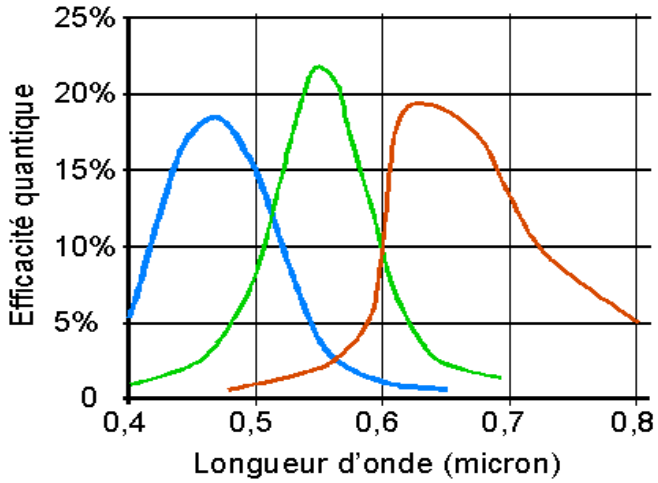
La sensibilité spectrale

Les émulsions argentiques ont une sensibilité spectrale très étendue dans l'ultraviolet (au delà de 350 nm). Il est donc impératif de les protéger de ces rayonnements à l'aide d'un filtre barrière anti UV à partir de 400 nm (sauf applications particulières comme la radiographie).



La sensibilité spectrale est donnée ici pour chaque couche en soi, sans l'action du filtre anti UV qui est incorporé dans la pellicule. On se rend compte que sans celui-ci, la couche bleue, que l'on peut prolonger au delà du graphique, enregistrerait du non visible, avec pour effet de surexposer la couche bleu.

Les photodiodes ont une sensibilité spectrale très étendue dans l'infrarouge (jusqu'à 1000 nm). Là où en argentique, il faut filtrer (bloquer) les UV en deçà de 400nm, il faut ici filtrer les infrarouges au delà de 700 nm.



Une prise de vues en conditions normales sans ce filtre infrarouge provoquerait une surexposition des rouges.

Notons que la courbe rouge se prolonge au delà du graphique.

La notion de gamma en vidéo.

Cette notion (qui vient de l'argentique) a été introduite en vidéo pour aligner le signal de sortie des caméras (qui est en principe proportionnel aux tensions de sortie et donc de gamma +/- 1) à celui des tubes cathodiques qui est non linéaire, du type :

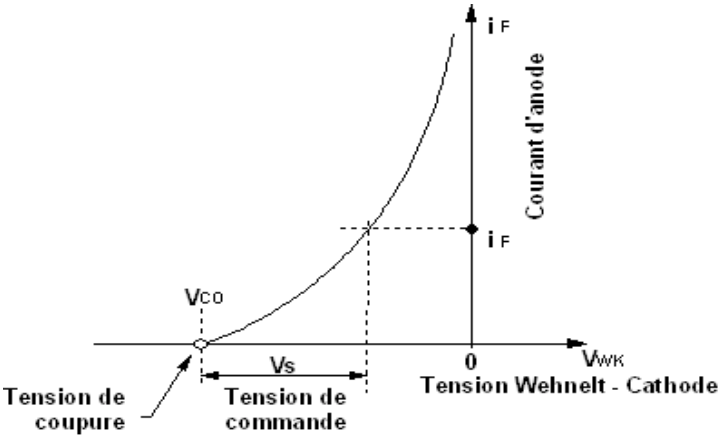
$$I_F = Av^{\gamma}$$

I_F est l'intensité du faisceau électronique du tube cathodique.

v est la tension de signal.

A est une constante

Dans cette formule, l'exposant γ (gamma) est de 2.2 à 2.5, selon le tube considéré. Cette courbe de transfert visualise cette relation mathématique, dans un repère linéaire / linéaire :



Les luminophores du tube ayant une réponse linéaire, cela donne :

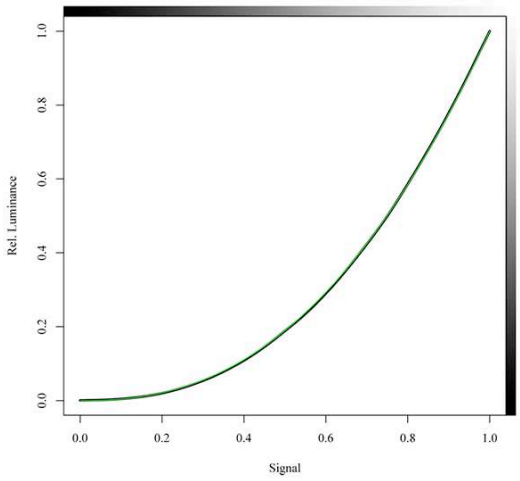
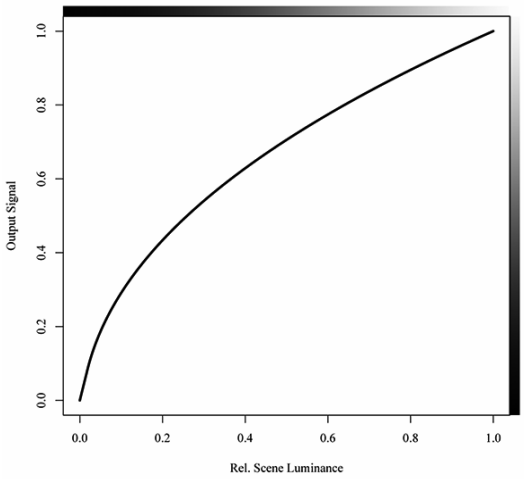


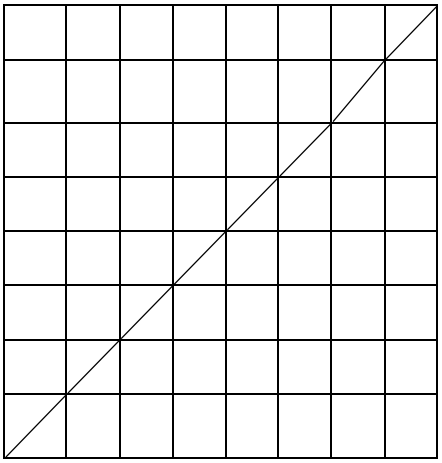
Image résultante sur l'écran : fonction de transfert du tube cathodique vers les luminophores

Le gamma de cette courbe est de +/- 2.3
Il n'y a plus la linéarité du signal vidéo, le contraste est sensiblement augmenté.



Pour retrouve cette linéarité, on applique une correction de gamma dans la caméra de l'ordre de 0.4 à 0.5. ...

Étrangement, cette nécessaire diminution du gamma ne se fait pas en sortie de capteur. Cela explique pourquoi les caméras vidéo de télévision avaient à l'origine une dynamique si faible.



Sur le tube, on obtient une image de gamma théorique de 1.

Dans la réalité, ce gamma est toujours supérieur, à la fois pour compenser la faible dynamique de l'image (voir : Mécanismes de la Vision page 11) et pour contrecarrer l'effet de la lumière ambiante qui délave l'écran. Il peut s'élever à plus de 1.5. Cette augmentation est produite par le tube qui agit "comme" un positif argentique de projection.

En vidéo, lorsqu'on parle de gamma, on ne parle pas d'une relation log / log, mais d'une relation linéaire / linéaire. Si on trace ces même courbes de transfert dans un système log / log, on retrouve des courbes, où le gamma = tangente de la pente de la partie +/- rectiligne, comme en argentique.

Dans le langage de la sensitométrie, gamma implique un système log / log et une relation de cause à effet entre des log luminations et des densités sur la pellicule argentique ou des log luminations en projection, que ce soit en argentique ou en numérique.

Le waveform et la sensitométrie.

Fondamentalement, le waveform met en relation la dynamique du signal produit par la caméra par rapport au signal vidéo utile (intervalle de 0.7 volts).

Attention, il y a souvent confusion :

Le signal vidéo total s'inscrit entre 0 et 1 volt.
L'intervalle de 0 à 0.30 volt est réservé aux tops synchro horizontaux et verticaux (le balayage). L'image s'inscrit entre 0.3 et 1 volt.
On dit que le signal image utile se situe dans un intervalle de 0 à 0.7 volt. Cela ne veut pas dire que l'on doit rester en dessous de 0.7 volt du signal total. Le 0 volt de l'intervalle image utile correspond au 0.3 volt du signal total, le 0.7 volt du signal image utile correspond au 1 volt du signal total.
Telles sont les embuches du jargon professionnel.

En ordonnée, nous avons le signal vidéo, exprimé soit en volt, soit en % du signal utile, soit encore en IRE.

IRE: norme de l'Institude of Radio Engineers.
100 IRE correspond au blanc, 0 IRE au noir, en principe.

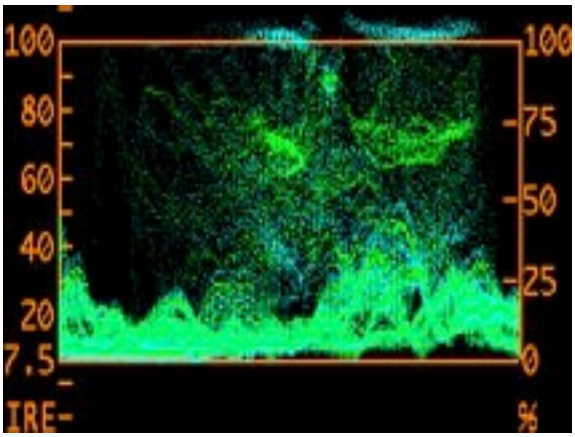
INTENSITÉ LUMINEUSE %	DIAPHRAGME ÉQUIVALENT	NIVEAU SIGNAL VOLT		NIVEAU SIGNAL %
100	BLANC	0.700	1.000	100
50	- 1	0.639	0.939	75
25	- 2	0.465	0.739	58
18	ND18%	0.347	0.647	50
12.5	+ 1	0.274	0.574	41
6.25	+2	0.217	0.517	25
3.125	+3	0.097	0.397	3

La relation des intensités lumineuses avec le niveau du signal donne un résultat qui tient compte de la correction de gamma dans la caméra. Appliquée au gamma du tube cathodique, cela donne image de gamma 1.4 On peut donc en conclure que les valeurs sur l'ordonnée sont en principe proportionnelles à l'image finale.

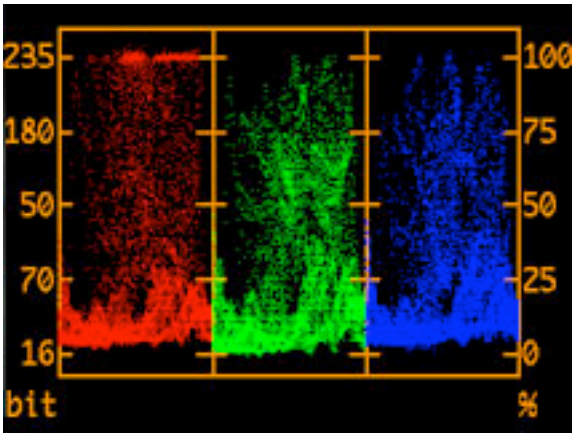
En abscisse, il n'y a rien, si ce n'est les valeurs électriques que les luminations ont produites.
Rien concernant les valeurs de ces luminations.

Le waveform ne nous donne pas un diagramme !

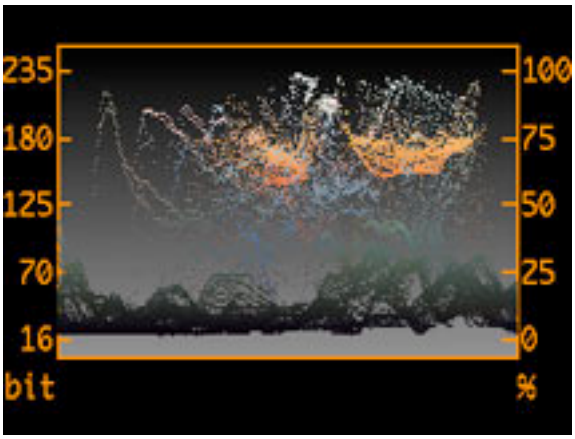
L'image que l'on voit sur le waveform est celle du signal en sortie de caméra. On y voit l'amplitude électrique du signal, rien d'autre.
Le signal peut être donné en composite (YC), en composantes RVB ou ne donner que les luminances (Y).



Composite.



Composantes



Luminances seulement.

Le waveform nous permet de vérifier si la dynamique du signal est compatible avec celle de l'intervalle de 0.7 volt, si les noirs ne sont pas trop tassés et si les blancs ne dépasse pas 0.7 volt (ce qui semble être le cas du signal composite).
L'analyse en composantes (fait à partir de la même image) nous montre que ce sont les verts qui sont un peu tassés et les rouges qui dépassent 100%. le waveform nous permet aussi de vérifier si une image voulue low key n'est pas trop collée au noirs ou trop claire, si une image voulue high key ne sature pas trop ou au contraire est trop dans le valeurs moyennes et/ou comporte trop de valeurs sombres.

La waveform est un appareil qui nous fournit des informations capitales sur la qualité technique des images, mais il faut toujours les confronter aux images sur un moniteur calibré.

Comme le waveform ne nous donne pas de diagramme, il ne peut pas nous donner un sensitogramme (une courbe sensitométrique) puisqu'il ne nous donne pas les luminations en abscisse.

Mais on pourrait "forcer" ces informations à rentrer dans le waveform en filmant plein cadre une sorte de coin de Goldberg.



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21

On aurait ainsi des valeurs logarithmiques des luminations, qu'il n'y aurait qu'à faire suivre dans la chaîne numérique.
Et on pourrait espérer en déduire le gamma sur le waveform.

Mais soit la dynamique des luminations de ce "coin" correspond à la dynamique acceptable par le signal vidéo. Nous aurions alors une image en escalier qui partirait du coin inférieur droit et irait jusqu'au coin supérieur gauche.
On penserait à un gamma 1.

Soit cette dynamique est franchement plus large. Il se peut alors que des informations au delà 1volt soient escamotées. Notre escalier partirait de l'angle inférieur droit par exemple pour monter jusqu'au quart supérieur gauche, et on penserait à un gamma supérieur à 1

Soit, cette dynamique est inférieure à la dynamique du signal, et notre escalier ferait une ascension molle du quart inférieur vertical droit vers le quart supérieur vertical gauche. Un gamma très doux déduirait-on, de l'ordre de 0.5.
Et on aurait tout faux.
Car enregistrer un dynamique plus ou moins grande ne modifie en rien le gamma de notre système de captation des images, qu'il soit argentique ou numérique.

Caméras pour la télévision et caméras pour le cinéma.

Une caméra de télévision doit pouvoir produire une image directement affichable sur un moniteur (donc en temps réel) et sembler satisfaisante à l'œil. Il faut donc que le signal sortant de la caméra soit totalement adapté aux caractéristiques du moniteur, en termes de dynamique, de colorimétrie, de sensation de contraste, etc. En conséquence, à l'instar de l'inversible en argentique (la diapositive), il est impossible d'avoir des détails dans les hautes et les basses lumières. Et, comme en inversible, les problèmes se posent surtout dans les très hautes lumières.

Une caméra de cinéma n'est pas contrainte par le direct.
Si c'est une caméra argentique, la question ne se pose même pas.
Si c'est une caméra électronique, analogique ou numérique, il faut qu'elle puisse s'affranchir des contraintes techniques imposées par le direct et qu'elle s'appuie sur au moins un principe de base de l'argentique : l'image produite par la caméra doit pouvoir enregistrer une très grande latitude d'exposition, et, pour y arriver, avoir un faible contraste (gamma).
On a raison de dire qu'une vraie caméra électronique de cinéma (forcément numérique depuis quelques années) produit une image « qui doit être développée ». D'où la notion de négatif numérique : Raw, DNG et enregistrements logarithmiques.

Travailler avec une caméra électronique, c'est être tributaire des caractéristiques sensitométriques de cette caméra là. Dans une caméra argentique, on met la pellicule qu'on veut. La caméra électronique "est la pellicule". La caméra numérique, ce n'est pas qu'une caméra, c'est aussi une partie du laboratoire : on a souvent accès à des réglages qui modifient le "rendu" de ces caméras.
Avec le numérique, le laboratoire rentre sur le plateau.

La sensibilité à la lumière.

On l'a vu, une émulsion argentique réagit de façon logarithmique aux luminations, « comme » l'œil. En plus, il y a une compression des hautes et basses lumières qui, certes, limite la dynamique, mais a l'avantage d'offrir un passage tout en douceur des noirs et des blancs vers les extrêmes. Aussi, la courbe sensitométrique met-elle en relations des logarithmes des luminations avec des logarithmes (les densités).
La courbe nous propose une « image » tout de suite parlante

En numérique, la réponse de chaque photosite (ou photodiode, cellule photosensible) présent sur le capteur est directement proportionnelle (linéaire) aux nombres de photons (aux luminations).
Cette réponse est électrique : sous l'action des photons, des électrons sont libérés au sein des photosites et génèrent des tensions électriques aux bornes de ceux-ci, proportionnellement aux nombre de photons.
Au delà d'une exposition limite, il y a saturation brutale.
Il n'y a quasi pas d'épaule.
La sensibilité dans les basses lumières est considérable, largement supérieure à l'argentique : quelques photons suffisent pour générer une tension.
Il n'y a pas de pied de courbe, ce qui peut être un avantage pour les tournages en très basses lumières.

Contrairement à l'argentique, on utilise le plus souvent un repère de coordonnées cartésien pour visualiser cette réponse (valeurs linéaires en abscisse et ordonnée).
On y met en relation des luminations (abscisse) avec des tentions électriques générées par le capteur, et non pas avec des densités (ordonnée) ou des luminances à l'écran.
Cela donne en théorie une droite à 45° (de gamma 1) pour une caméra vidéo classique.

Rien qui puisse nous permettre de « nous faire une image parlante» de cette relation de cause à effet. Forcement : cette droite ne représente pas une image, mais la réponse électrique du capteur à des luminations.
Cela ne deviendra image qu'après traitement analogique / numérique / analogique.

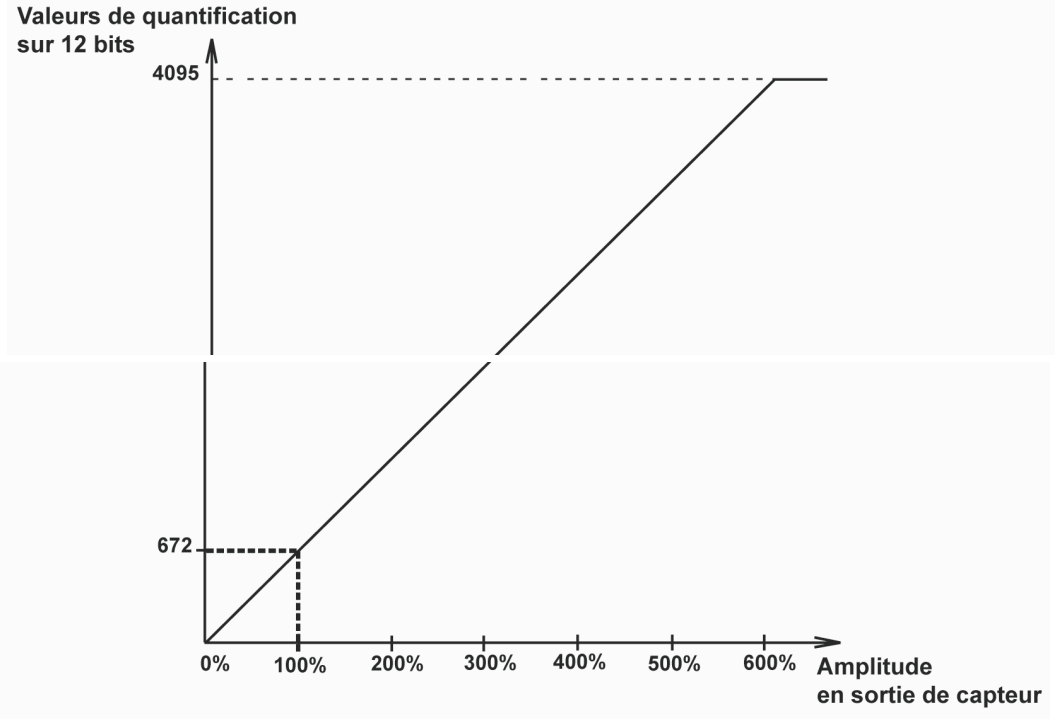
Note : une image photographique est toujours analogique, peu importe qu'elle soit produite par des moyens argentiques ou numériques.

La latitude d'exposition.

La latitude d'exposition d'une caméra numérique de télévision (6 à 7 stops) ne suffit pas pour un usage cinématographique. Ce ne sont pas les capteurs qui limitent aujourd'hui cette dynamique, mais le traitement du signal adapté à des besoins télévisuels (le direct).
La latitude d'exposition (la dynamique) des capteurs dépend du niveau de bruit électronique dans les basses lumières (comme le voile en argentique) et de la capacité maximale des photosites (exposition limite), exprimée en nombre d'électrons générés par les photons.
C'est le rapport signal / bruit, généralement exprimé en dB (pour mémoire, 6 dB = 1 stop)
Si les photosites ont par exemple une capacité maximale de 40.000 électrons et un capacité minimale de 10 électrons (pour rester au dessus du bruit) on obtient une dynamique de 40.000 : 10 = 4000 : 1, en valeurs linéaires !
En valeurs logarithmiques, cela donne : log 4000 = 3.60, soit 12 stop (3.60 : 0.30) ou 72 dB.
Une caméra de télévision basique écrête nécessairement la capacité des capteurs au delà de 6 à 7 stop (36 à 42 dB).

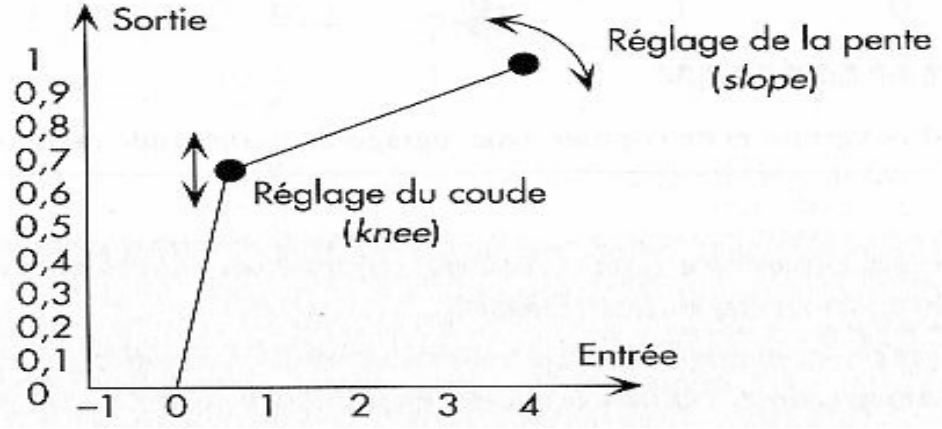
La quantification numérique.

Pour une utilisation cinématographique, la quantification doit être suffisante pour pouvoir restituer toutes les nuances. À la sortie du capteur, le signal électrique est d'abord échantillonné, puis quantifié.
Dans notre exemple, il faut quantifier 4000 niveaux différents par couleur.
Une numérisation en 12 bits s'impose, car 2 puissance 12 = 4096 niveaux.
La question qui se pose maintenant est de savoir comment on peut faire entrer cette dynamique de 4000 niveaux dans le signal vidéo utile de 0.7 volt.
En optimisant les choses, on peut espérer y faire renter 672 niveaux, mais pas plus.

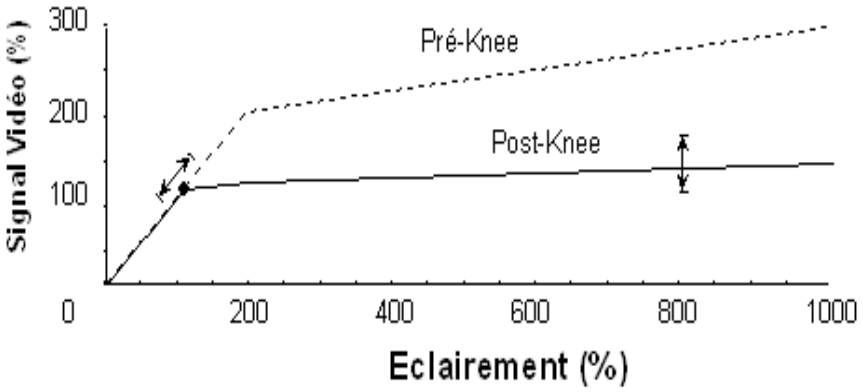


L'amplitude en sortie de capteur, numérisée en 12 bits, est exprimée en % de l'amplitude maximale du signal vidéo qui est de 0.7 volt (672 niveaux). Tout ce qui dépasse ce niveau est perdu, réduit à un blanc 100%.

Les fabricants ont d'abord cherché à compresser les blancs en agissant sur le signal de sortie du capteur (correction analogique, avant quantification), sans remettre en cause le principe de quantification sur une échelle linéaire. Cela consiste à compresser les blancs au delà d'une certaine tension (le Knee point, que l'on peut traduire par point d'inflexion). Nos caméras Panasonic et JVC proposent ce type de compression dans leurs menus.



Sur des caméras plus performantes, et sous réserve que l'on puisse enregistrer un signal ayant une amplitude de 128%, on peut récupérer la presque totalité du signal.
Dans un premier temps, les informations comprises entre 200 et 1000% de la dynamique maximale du signal est réduit à un écart de 200% à 300% : le pre-knee. Ensuite, une deuxième compression, le post- knee, convertit le 300% en 128%.
Voici ce que cela donne, schématiquement

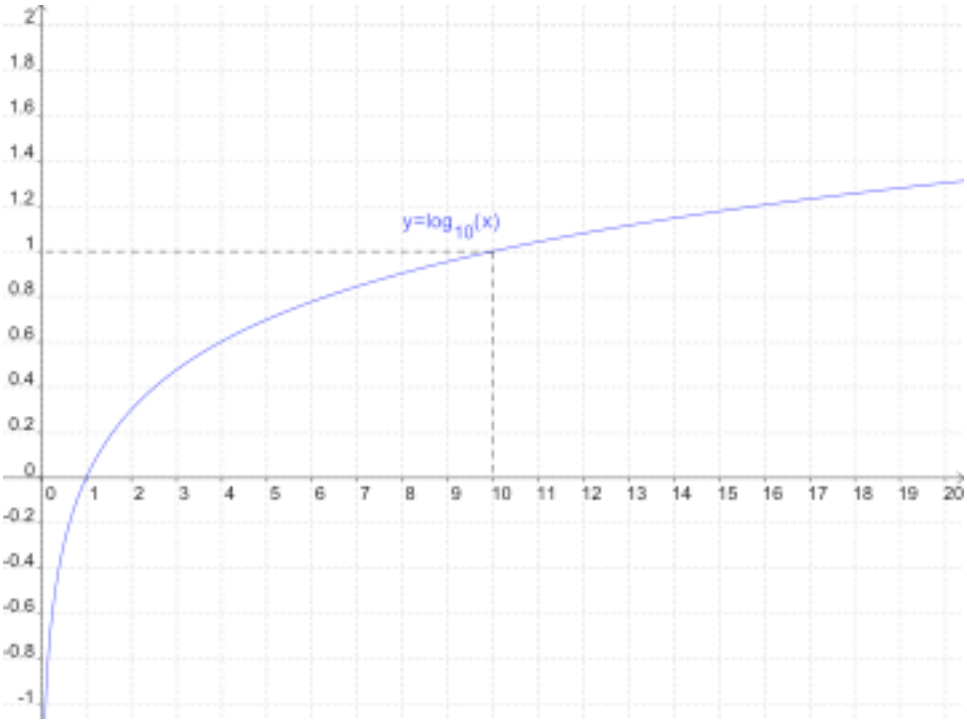


Certes, on a récupéré des hautes lumières. Mais il y a un une inflexion au niveau du knee qui a pour conséquence que les hautes lumières se développent de manière

exagérément douce. Il y a une discontinuité dans le « rendu », et c'est très gênant

En quantifiant sur une échelle logarithmique, on obtient une courbe dont l'allure est la suivante :

Représentation graphique du logarithme décimal de valeurs linéaires dans un repère orthogonal.



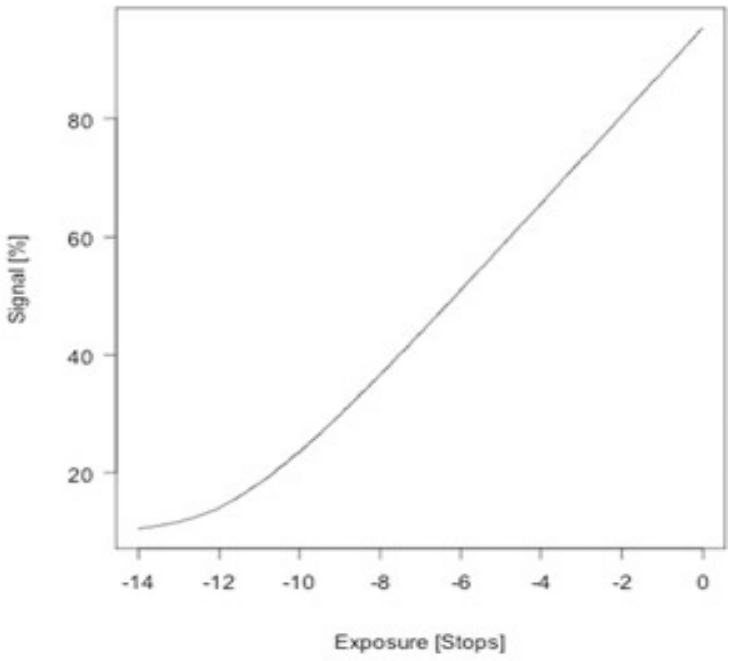
En abscisse, des valeurs linéaires, en ordonnée des logarithmes.
Il n'y a plus de discontinuité. La compression des hautes lumières se fait sans faire appel à des circuits correcteurs en sortie de capteurs.
On se rend compte que le bricolage pre-knee / post-knee consiste à « imiter » une quantification logarithmique…avec des droites aux angles différents par rapport à l'abscisse.

ARRIFLEX met à notre disposition une documentation sensitométrique riche, mais qui doit être interprétée.
Explorons-la.

Ainsi cette courbe log "C", dont il est dit (traduction) :

"La courbe log "C" consiste en un encodage logarithmique de la scène, ce qui veut dire que la relation entre exposition mesurée en stops et le signal est linéaire sur une large partie de la courbe.

Chaque augmentation d'un stop à l'exposition produit une augmentation quantitativement égale (of the same amount) du signal. La pente de la droite s'appelle le "gamma"



Nous avons à faire à un graphique orthonormé, la pente est en principe de 45°.

Tangente 45° = 1

Le gamma de cette courbe est donc **1 (**ou plus).

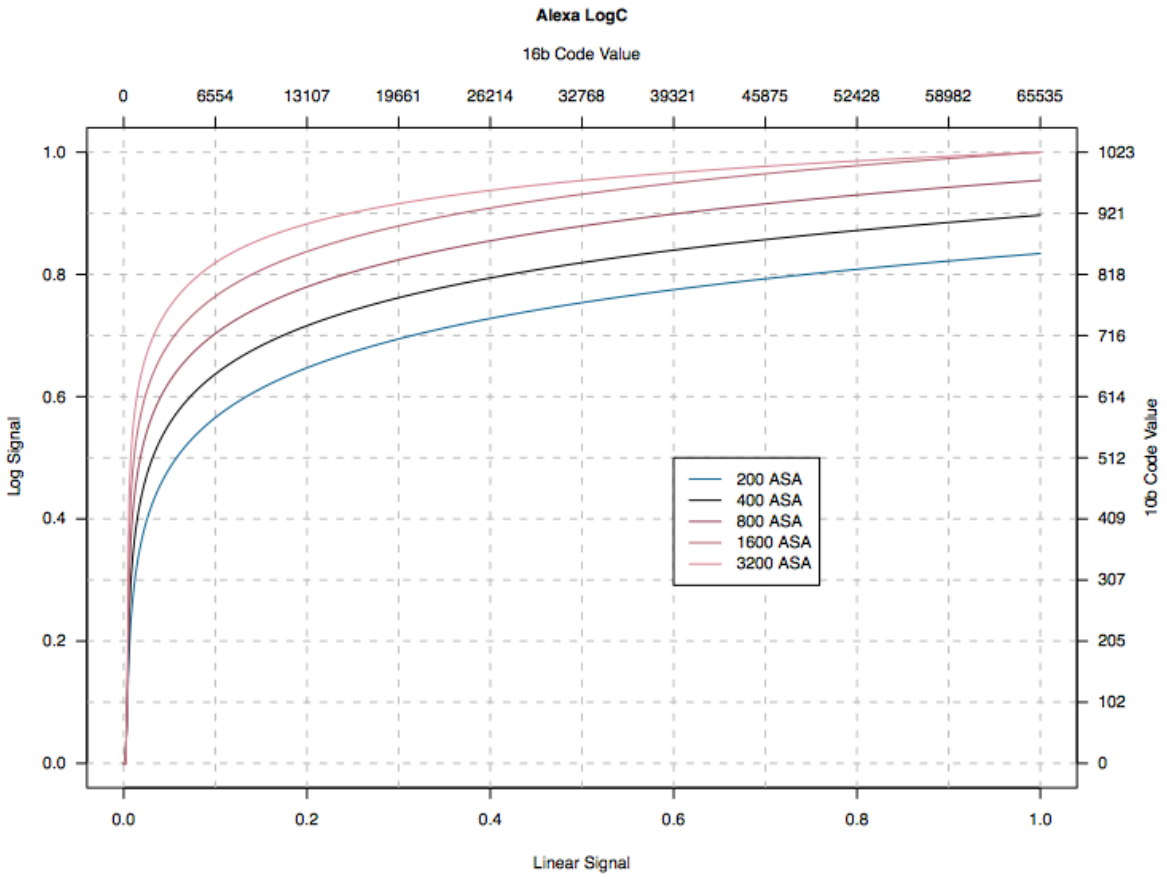
Sources: ARRIFLEX.

On y met en relation des log luminations avec un résultat en % du signal dont le gris neutre (50%) correspond au log luminations de la plage -6 (+/- milieu de courbe).

C'est n'est pas une vraie courbe sensitométrique, car il n'est pas de l'action du projecteur. Il manque juste le résultat "image".

En fait, le système Log C est constitué de plusieurs courbes pour différents indices d'exposition. Il a été initialement mis au point pour les caméra D20 et D21.

La quantification logarithmique de l’ALEXA selon ces indices :



Sources: ARRIFLEX.

En abscisse (en haut), les valeurs linéaires sur 16bits (65536 valeur) et en ordonnée (à droite), les correspondances sur 10bits. Entre les deux, une interprétation logarithmique qui compresse les hautes lumières (entre 6554 et 65535) sur une portion réduite des 1024 valeurs du 10bit.

Notons :

- le début de chaque courbe semble vertical. Pourtant, c'est dans cette zone là que se trouvent les informations déterminantes de l'image de 0 à +/- 600 niveaux. Cela est du au fait qu'il faut ici quantifier 65536 valeurs, alors que dans l'exemple "académique" de la page précédente il n'y en a qu'une vingtaine. Il faudrait considérablement élargir le graphique pour retrouver des courbes plus lisibles dans les moyennes et basses lumières.

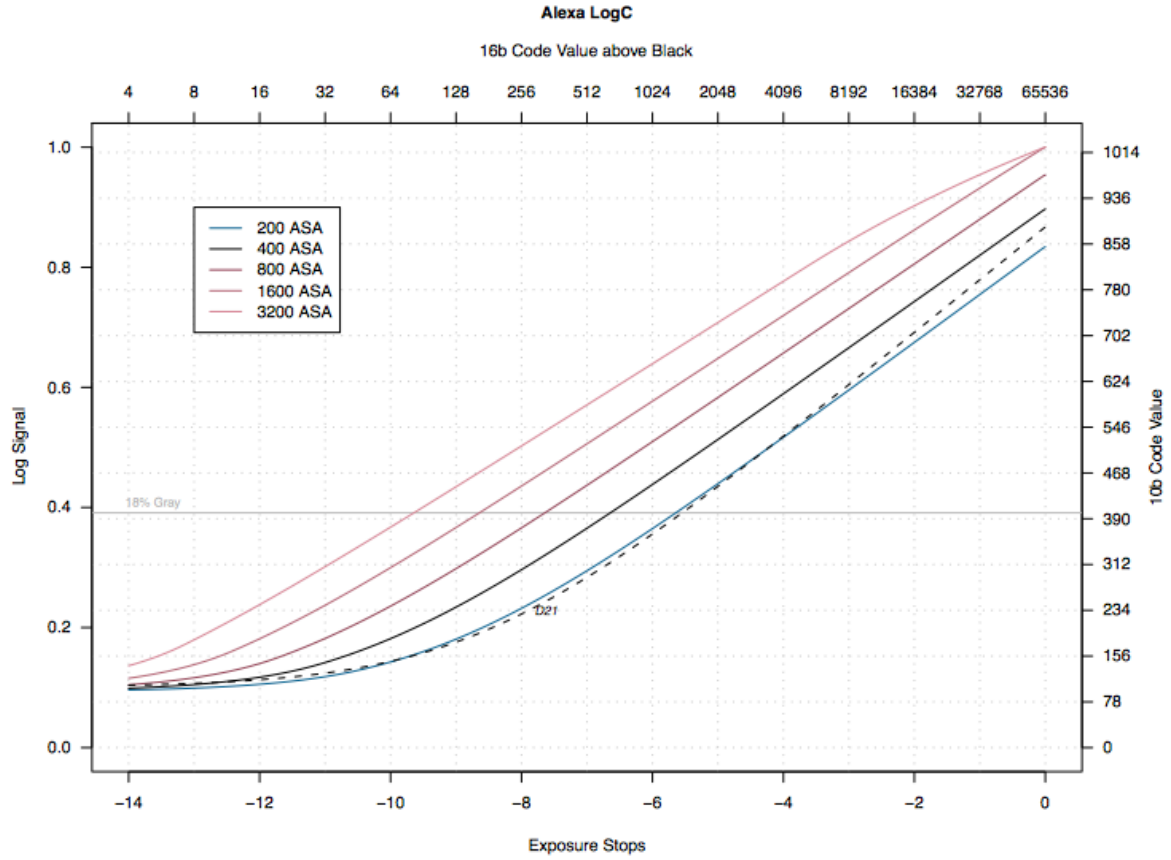
- en abscisse, en bas, le signal en valeurs linéaires (sortie du capteur). En haut, les valeurs linéaires de quantification qui proportionnelles aux luminations.

- en ordonnée, à gauche, le signal, en valeurs logarithmiques (le signal vidéo utile, sur une échelle de 0 à 1 (ce ne sont pas des fractions de volt !).

Nous sommes dans un système linéaire/log, ce ne sont pas des courbes sensitométriques.

Pour y arriver, il faut mettre en relation des valeurs logarithmiques avec des valeurs logarithmiques, et une cause (les luminations) à un effet (l'image produites par ces luminations).

C'est ce vers quoi tend le graphique suivant : il met en relation des luminations avec le signal de l'ALEXA, le tout en valeurs logarithmiques.



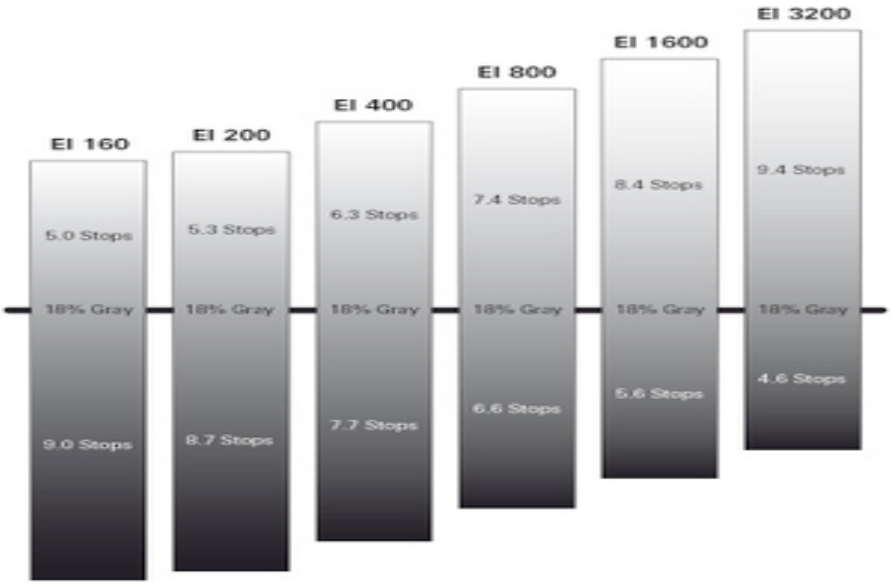
Sources: ARRIFLEX.

En abscisse, en haut, les valeurs de quantification selon un progression géométrique, analogue aux logarithmes. En bas, les valeurs d'exposition, en stops (donc en valeurs logarithmiques)
En ordonnée, à gauche, les logarithmes du signal électrique.
Ça commence à ressembler à une courbe sensitométrique, mais ce n'en est pas vraiment une : impossible d'en déduire le gamma à l'écran. En effet, pour qu'on puisse en déduire le gamma, il faudrait que l'on ait en ordonnée des densités ou des luminances en valeurs logarithmiques, et non pas des volts.
Ceci ne peut se faire qu'un mesurant les densités ou les luminances d'une image réelle, en projection ou sur un écran de référence, après traitement de Log C.
Cette mesure peut se faire artisanalement au spotmètre, avec une marge d'erreur négligeable (1/10 stops).

On peut attribuer à cette courbe un gamma de 0.7 (la pente de la courbe est de +/- 35°, la tangente de cet angle = 0.7) par rapport au signal, (le graphique est orthonormée). Il faudrait aussi que les valeurs du signal soient rigoureusement proportionnelles aux luminances en projection ou à l'écran. Rien ne le garantit.

Malgré ces réserves, ces courbes montrent déjà quelques différences fondamentales avec l'argentique : pas d'épaule, mais une limite radicale qui correspond au seuil de saturation des photosites, une courbe presque rectiligne à 3200 asa.
Un signal utile qui commence à 0.1 log signal, certainement pour éviter le bruit numérique
On mesure ce qui différencie les courbes entre elles aussi : apparition d'un pied de courbe à 1600 asa qui va en augmentant à l'inverse de la sensibilité et devient considérable à 200 asa.
Et on peut se poser des questions concernant la sensibilité.
Arriflex propose apparemment comme référence le gris 18% à 40% du signal pour chaque courbe. Est-ce une bonne idée ?
Le gris neutre de la courbe 3200 ASA est presque à la verticale de la plage 10. Cela laisse à peine plus de 4 stops pour les noirs. Par contre, la plage des valeurs au dessus de gris 18% est gigantesque : 9 stops
À l'opposé, la courbe 200 ASA à un gris neutre un peu en retrait de la plage 6. Ça laisse près de 6 stops pour les noirs. Et 6 pour les blancs.

Ne faudrait-il pas conserver la référence de 18% à 40% du signal pour la courbe 200 asa (le gris neutre est +/- au milieu de la courbe), et mettre le 18% à 50% pour la courbe 3200 asa ? Et pour les autres sensibilités, trouver des positionnements intermédiaires ?
Pour 3200 asa, il faudrait alors afficher +/- 400 asa, et non pas 3200 !
Mais alors, il faut changer tous les indices de sensibilité, sauf 200 asa. Et étalonner différemment selon la sensibilité, puisqu'on ferait voyager le gris neutre de 40% à 50%.
En fait, avec ces indices de sensibilité différents, ARRI a surtout cherché à nous proposer des "rendus" différents en utilisant des courbes de quantification différentes et non des amplificateurs et/ou des atténuateurs, ce que confirme cette autre documentation d'ARRIFLEX :
Sources: ARRIFLEX.



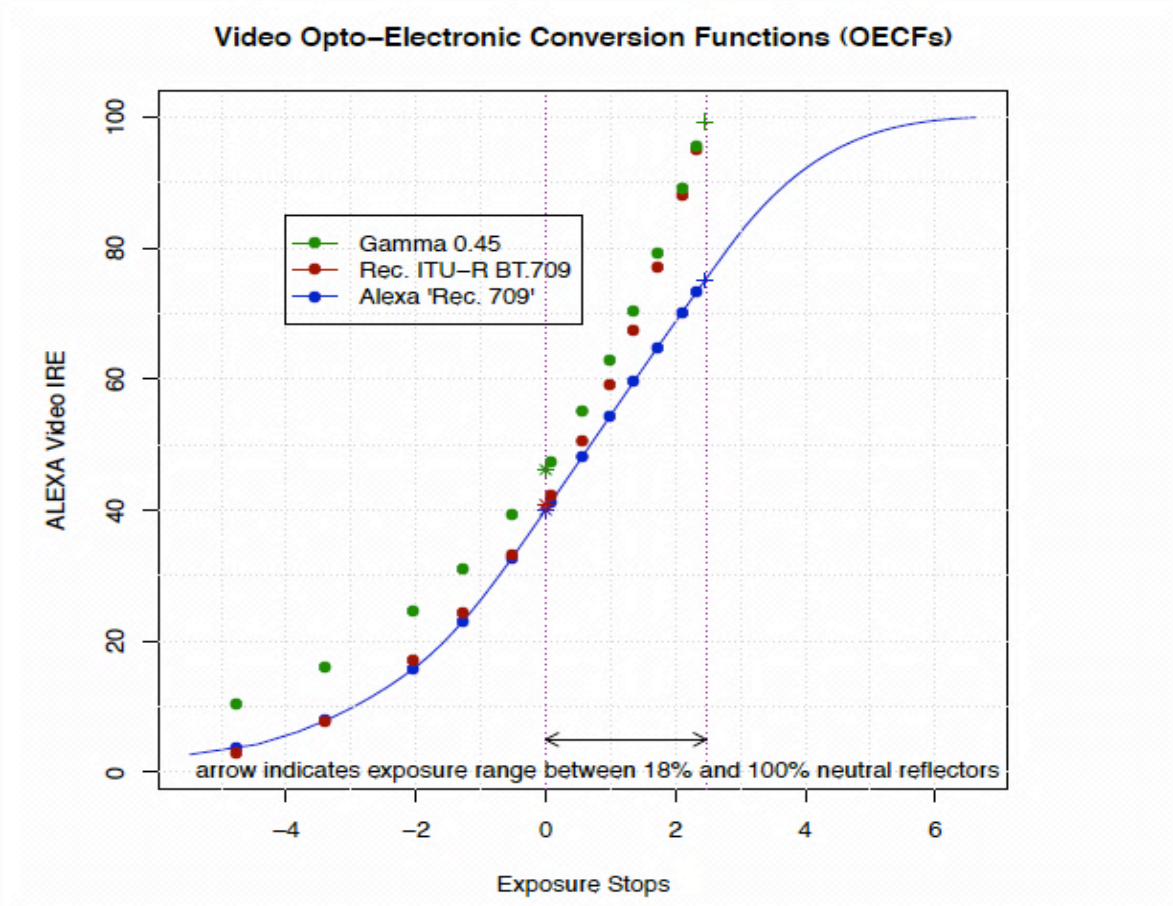
On peut aussi se poser la question de l'absence d'épaule et de ses conséquences sur le rendu des hautes lumières : n'avons-nous pas là un « mur », comparable à de la limite du 1 volt dans un système vidéo classique ?

Les courbes suivantes comparent, en valeurs logarithmiques, les courbes selon les normes gamma 0.45 (en vert, pointillée), les normes Rec.ITU - B BT.709 (en rouge, pointillée) et ALEXA Rec. 709 (courbe bleue, continue).
Ces courbes sont dites "fonction de conversion opto - électronique".

La courbe ALEXA Rec. 709 est obtenue un peu selon la logique du diagramme de Jones : sa fonction de conversion opto - électronique combine les courbes Log C (comparable au négatif) avec une courbe de redimensionnement qui intervient comme un positif argentique et une compensation par rapport au gamma du moniteur et/ou de la projection.

C'est une courbe (en bleu) dont la pente est de +/- 57°, soit de gamma +/- 1,5.
Cette courbe ressemble à celle d'une image sur positif argentique !
Il y a une épaule !
La seule chose qui manque pour que l'on puisse parler d'un véritable sensitogramme, c'est le résultat mesuré à l'écran, qui dépend aussi du projecteur et des conditions d'observation.

Courbe de l'ALEXA en mode REC 709 :



Sources: ARRIFLEX.

Remarquons :

- le gris neutre de la courbe Rec. 709 (0 log exposition) se situe à hauteur de 40 IRE, proche de celui des deux autres courbes.

- le blanc de référence 100% de la courbe Rec. 709 (+/- 2. 3 log exposition) se situe à hauteur de 75 IRE, ce qui laisse une large marge pour de très hautes lumières. Le blanc de référence 100% des deux autres courbes plafonne à 100 IRE. Le gain de détail dans les hautes lumières de la courbe Rec. 709 est substantiel.

Pourquoi un fabricant donne-t-il des courbes aussi différentes du rendu d'une même caméra ? Simplement parce que ces courbes résultent d'étapes différentes du processus de fabrication des images et/ou répondent à des nécessités différentes (calibrer des fonctions de transfert et de conversion par exemple).

Pour nous, utilisateurs avertis, deux choses comptent :
- comprendre le processus de fabrication. De ce point de vue, les courbes données par le fabricant sont déterminantes.
- Être en mesure de vérifier concrètement à quoi cela correspond, de la prise de vue à la projection, car ***le projecteur (ou l'écran) dans la chaîne numérique, c'est l'équivalent du positif en dans la chaîne argentique : le projecteur ou l'écran agissent sur la qualité.***

Notre processus d'investigation sensitométrique doit être simple.
Nous ne pouvons pas tirer de conclusions définitives des courbes intermédiaires des fabricants. Ce n'est à partir de nos investigations en projection que nous serons en mesure d'apprécier le rendu d'une caméra. Toutes nos investigations sensitométriques doivent être confrontés à un ou plusieurs essais filmés.

Mise en œuvre de la sensitométrie appliquée à la prise de vue numérique.

Enregistrement d'un coin de Goldberg.

Il est impensable d'enregistrer directement un coin de Goldberg sur le capteur par contact, à l'instar de ce qui se pratique en argentique.

Une charte électronique ne fait pas plus l'affaire : les résultats qu'elle peut donner à l'écran sont indépendants des conditions de prise de vues.

Filmer une charte sur support solide ne nous donnera qu'une dynamique franchement insuffisante, de l'ordre de 5 à 6 stops.

Une seule solution : fabriquer une charte lisible par transparence et constituée des gélatines nécessaires pour couvrir la dynamique la plus large possible.

Plutôt que de foncer tête baissée dans des investissements assez lourds et sans garantie de résultat, nous avons opté pour une fabrication artisanale d'un prototype. La charte était constitué d'une seule succession de gélatines gris neutres découpées

dans des rouleaux de gélatine LEE couvrant une dynamique de14 stops, soit de ND 0.00 à ND 4.20 par bonds de 1 stop.

Sachant que les densités des gélatines disponibles ne dépassent pas ND 1.20 (4 stops), il a fallu superposer des gélatines pour obtenir la dynamique requise.

Nous nous somment vite rendu compte que ces gélatines ne sont pas rigoureusement neutres (ce qui engendre une dominante colorée qui s'accroît avec la densité) et surtout qu'elles sont le plus souvent surévaluées : de l'ordre d'un tiers à un demi stop pour les plus denses. Ceci augmente d'autant le nombre superpositions nécessaires.
Ces superpositions ont généré un phénomène très dérangeant, probablement dû aux réflexions entre les multiples surfaces : les gélatines superposées s'éclairent mutuellement et leur densité totale devenait très vite largement inférieure à l'adition arithmétique des densités de chacune, au point qu'il était totalement illusoire d'obtenir des densités au delà de ND 2.40, loin de ND 4.20 nécessaires.

En conséquence, nous avons dû construire deux coins de Goldberg superposés avec une combinaison semblable de filtres. Éclairés avec une source de lumière diffuse dédoublée pour que chaque coin soit éclairé à un niveau approprié, nous avons obtenu la dynamique totale souhaitée.
Le rapport d'éclairement entre les deux coins était de l'ordre de 128 à 1, soit une différence de 8 stops.
Il a fallu "faire avec" une dominante colorée qui augmentait avec la densité et surtout une constante de coin plus qu'irrégulière que nous avons du quantifier précisément au spotmètre, plage par plage.
La constante de coin aléatoire a rendu le tracé des courbes assez laborieux.

La charte, schématiquement :

- Les valeurs ND en italiques sont celles qu'on aurait dû obtenir.
- Les valeurs ND en gras correspondent à celles effectivement obtenues.

Avec éclairement maximal

			0.90 théorique			*1.80 théorique*	*2.10 théorique*
0.00	**0.30**	**0.60**	**1.00**	**1.20**	**1.50**	**1.70**	**2.20**

GRIS NEUTRE +/- 210

Avec éclairement à - 8 stop (ou, en lumens, 128 x moins)

2.10 théorique	*2.40 théorique*	*2.70 théorique*	*3.00 théorique*	*3.30 théorique*	*3.60 théorique*	*3.90 théorique*	*4.20 théorique*
2.30	**2.50**	**2.80**	**2.90**	**3.40**	**3.80**	**4.00**	**+/- 4.10**

Malgré une constante de coin *"autour"* de ND 0,30, la série de 5 essais sensitométriques que nous avons réalisés (doublé de prises de vues en décor naturel) est assez instructive, tant sur le plan sensitométrique que sur le plan de la méthode mise en œuvre.

Les cinq courbes sensitométriques

- Caméra : SONY F3.

- Objectif : ZEISS 50mm T 2,1

- Réglages caméra : REC 709, S Log, CINELIKE 4.

- Effets fabriquées : High Key, Super Contraste.

- Pour toutes les courbes, la dynamique du projecteur dans laquelle les courbes vont s'inscrire est de 9 stops (de EV 2 et EV 11 sur l'ordonnée).

REC 709

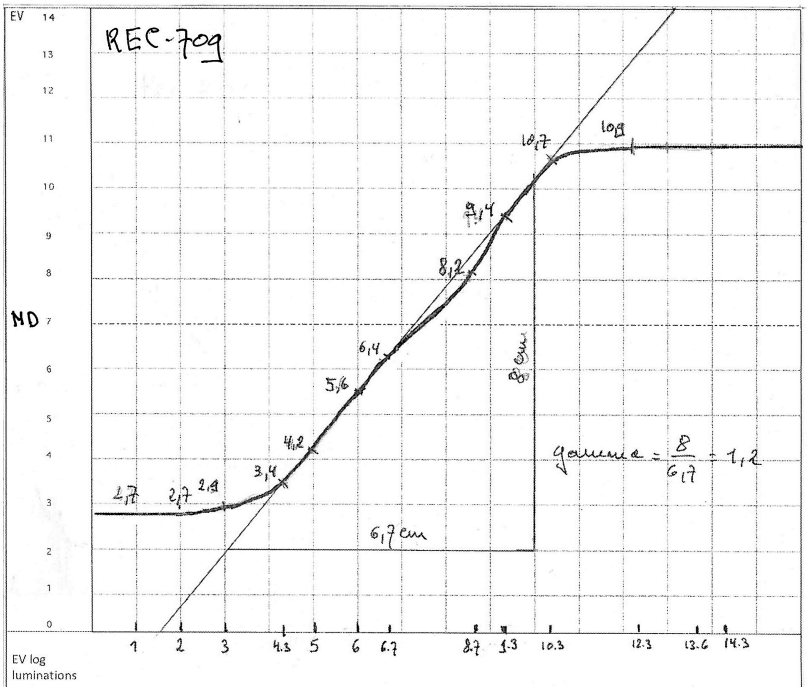
Gamma 1,2

Dynamique lumination : 7,5 stops

Dynamique en projection : 8 stops

Pied de courbe : relativement doux.

Épaule : presque inexistante.



En projection, les plans tournés en décor naturel apparaissent trop contrastés, les très hautes lumières brulées, les couleurs très (trop ?) saturées. Tout cela est conforme à la courbe qui visualise la norme UIT - R BT 709, (page 44) qui elle aussi n'a pas d'épaule. Tout au plus peut on penser que le pied de la courbe SONY F3 pourrait être plus doux. La courbe ALEXA REC 709 (même diagramme, page 44) est, de ce point de vue, parfaite. Notons qu'elle a une dynamique des luminations de 10 stops. Mais la courbe ALEXA REC 709 est une courbe de conversion optoélectronique, quantifiées en abscisse en % du signal vidéo utile. Il faut, pour que la comparaison soit vraiment significative, que cette courbe rende compte de valeurs mesurées en projection. Cela implique de réaliser avec une ALEXA des essais sensitométriques filmés et mesurés en projection.

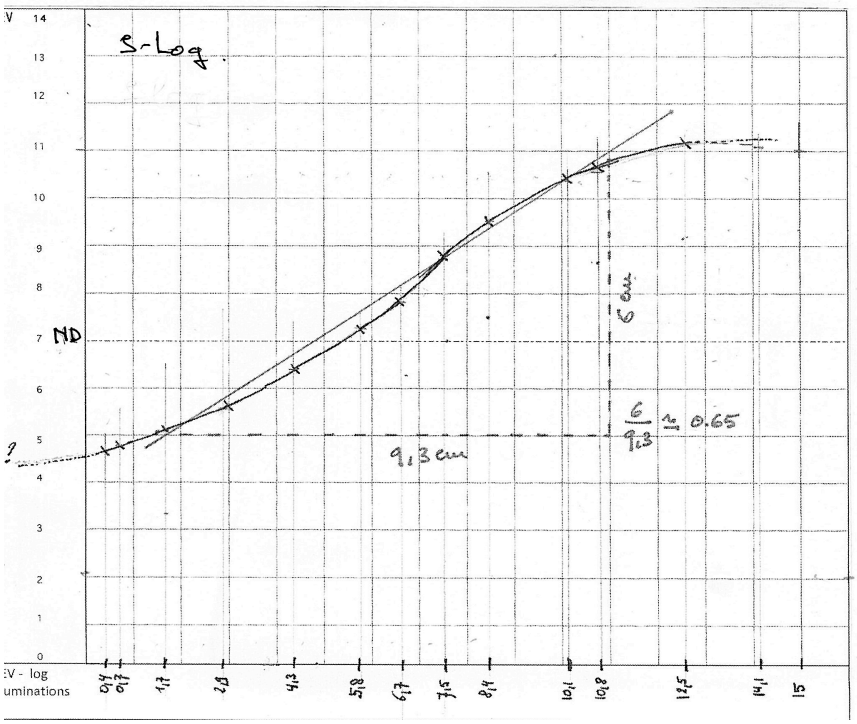
S - LOG

Gamma : 0,65

Dynamique luminations : plus de 14 stops

Dynamique en projection : plus de 6 stops.

Courbe totalement en S, pied et épaule très larges.



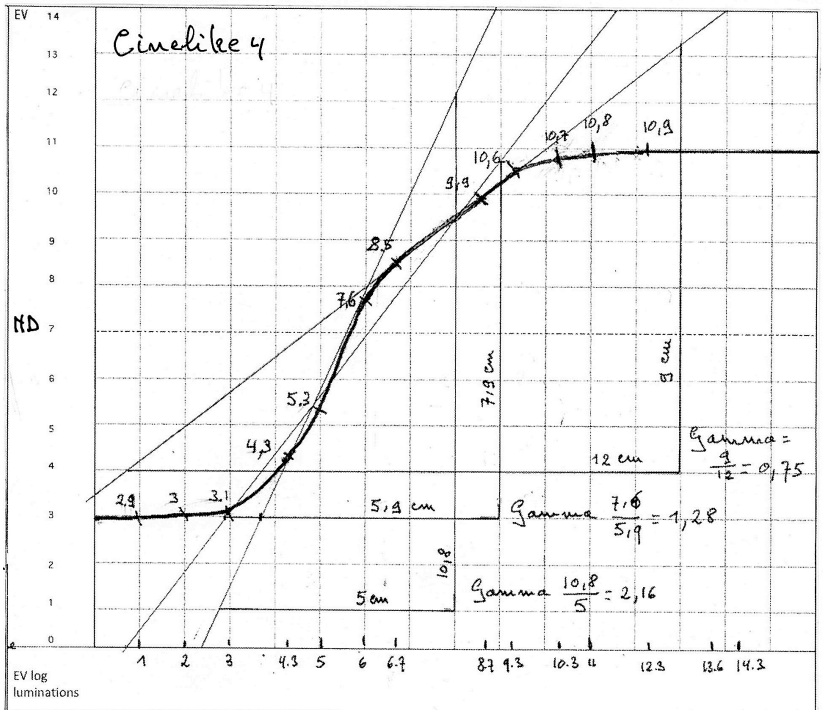
La dynamique luminations est de + 14 Stop (ou EV). Pour avoir toute la courbe, il faudrait exposer à plus 2 stops. Pour situer la courbe autour de ND (EV 7), il faudrait exposer à mois deux stops. Un coin de Goldberg de 14 stops pour ce genre de courbe ne suffit pas.

CINELIKE 4

Dynamique luminations : 8 stops

Dynamique en projection : 8 stop.

Gamma : il y en a 3.
Basses lumières, 2.16
Hautes lumières, 0,75
Moyenne : 1 ? 1, 28 ?
Cette courbe est obtenue en agissant sur 2 Knee Points autour de EV 8,3 et EV 10,5.
En projection, sensation de douceur.



Mais les noirs sont bouchés, sans nuances, à cause d'un gamma basses lumières très raide (2,16). On rêve de pouvoir tirer les noirs vers la gauche de 2, voire 3 stops pour avoir plus de détails dans les noirs, sans perte du sentiment de douceur. Il faudrait pour cela disposer d'une dynamique luminations d'au moins 13 stops (avec marge de sécutité), et, fort probablement, fabriquer ce "Cinelike 4" à partir d'un enregistrement en RAW ou en S - LOG.

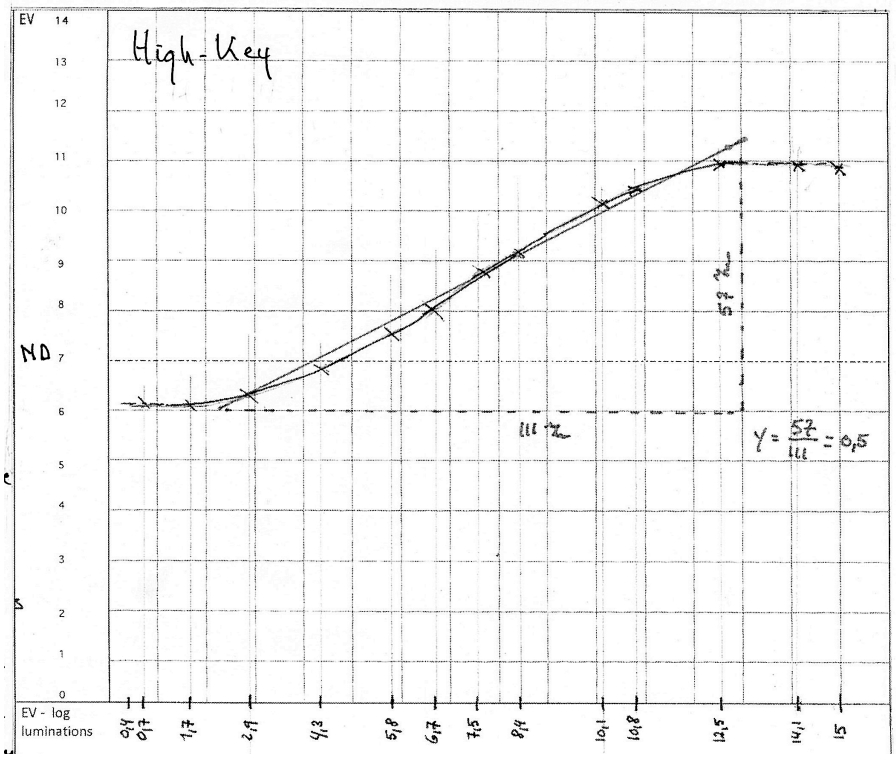
HIGH KEY

Gamma : 0,5

Dynamique luminations : 10,5 stops.

Dynamique en projection : 5 stops.

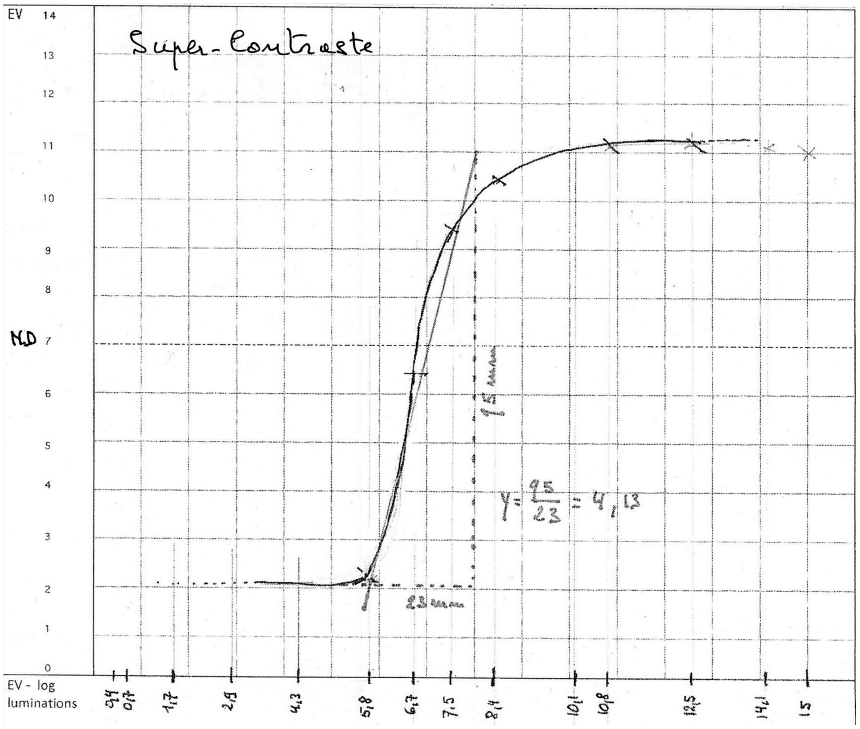
Pied et épaule suffisamment larges.
En projection, belle palette de gris clairs et de blancs, sans aucune sensation de saturation des blancs extrêmes, mais d'éblouissement



Il faut juste prendre garde à ne pas filmer des zones situées exclusivement dans la pénombre : on n'obtiendrait qu'une sensation de grisaille molle.

SUPER CONTRASTE

Seule courbe qui exploite les 9 stops de dynamique projecteur. Pied très raide, épaule très large : on devrait en toute logique attribuer 2 gammas à cette courbe. Mais en projection, le nuancier des blancs ne l'emporte pas sur le sentiment de contraste violent très défendable.



Mais on peut aussi souhaitez travailler avec une palette plus nuancée, où les valeurs lumineuses se répartissent de façon plus homogène : une belle courbe raide, mais en "S". Dans cette hypothèse, les outils disponibles dans la caméra n'y suffiront pas, il faudra utiliser ceux de l'étalonnage.

À l'issue de cette expérimentation "artisanale", on peut dégager les conditions minimales pour une mise en œuvre plus aisée.

1° On ne peut pas se contenter d'un coin de Goldberg qui ne couvre *"que"* 14 stops.
2° Il faut minimiser radicalement la superposition de filtres à cause des effets pervers que cela produit.
3° On a tout intérêt de travailler avec des filtres calibrés, condition sine qua non pour une constante de coin digne de ce nom.
4° Il faut disposer d'un local où on peut faire le noir total.

La société Tiiffen commercialise les filtres ND Kodak WRATTEN. La gamme proposée va de ND 0.10 à ND1.00 par bons de 0.10 plus trois filtres de ND 200, 300 et 400. Le tout dans trois formats : 10x10 cm, 15x15 et 35x450.
Ils ne sont pas donnés. Mais au moins, on peut minimiser les superpositions de filtre et bénéficier d'une constante de coin quasiment parfaite.
http://www.tiffen.com/results.html?search_type_no=134&tablename=kodakaccessories

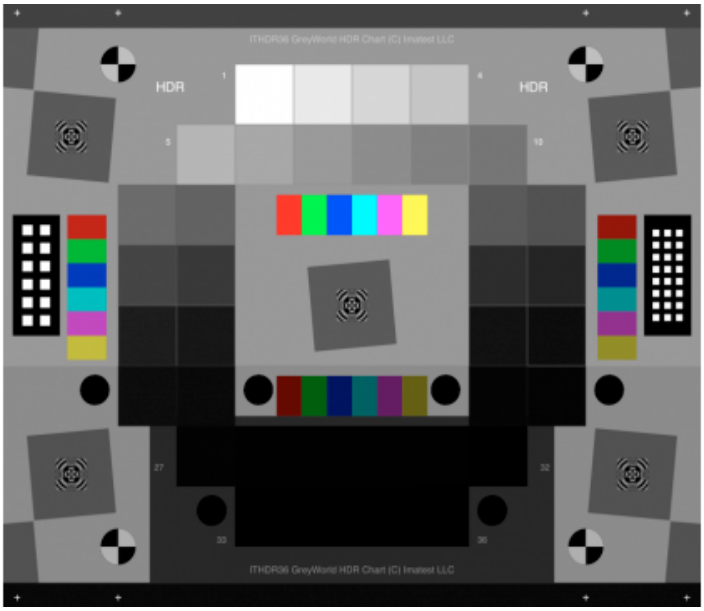
Mieux, on peut aussi jeter son dévolu sur des chartes spécifiquement destinées à des investigations sensitométriques.

La société IMATEST en propose :

http://www.imatest.com/2015/09/high-dynamic-range-target-led-lightbox/

Il n'est pas sûr que cette option soit plus chère que celle des filtres WRATTEN.

<u>Une de mires IMATEST :</u>



La densité maximale est de ND 6.00, soit une dynamique de 20 stops.

La boîte à lumière :



Dans tous les cas de figure, la lecture a spotmètre des valeurs réelles des plages et l'enregistrement du coin doivent se faire dans le noir total, sans quoi on voile sensiblement et irrémédiablement les valeurs sombres, et nos conclusions seront faussées.

On peut se passer de la boîte à lumière IMATEST pour des raisons d'économie (ou peut se satisfaire d'un mur blanc éclairé de manière égale), mais, que l'on travaille avec une charte IMATEST ou avec un charte confectionnée à partir des gélatines WRATTEN, il est vivement conseillé d'en construire une, sensiblement plus simple à réaliser que pour la version "artisanale" (une seule source diffuse). Il sera alors plus facile d'obtenir un noir total du côté charte / caméra.

Contraintes de ces dispositifs.

- Ce "coin" va être filmé. L'objectif peut en modifier le contraste. Il peut y avoir du flair (réflexions diverses dans la chambre noire de la caméra qui peuvent délaver les noirs). Pour minimiser ces effets parasites, il faut si possible afficher un diaphragme de l'ordre de 5.6, ce qui optimise le rendu de l'objectif. Mais, comme dans le cas d'un Key Light, ce n'est pas une vérité scientifique absolue que l'on cherche, mais la vérité en condition de tournage, avec entre autres les altérations induites par les objectifs de tournage.

- Prendre garde à la couverture lumineuse de l'objectif soit optimale (éviter de travailler à toute ouverture). La couverture se vérifie aisément sur un waveform : il faut qu'une plage 18% (ou blanche sous exposée de 2 1/2 à 3 stops) éclairée de manière uniforme y produise une horizontale absolue.

La lecture des différentes plages doit être mesurée, fut-ce pour vérification, avec un spotmètre au 1/10 de stop avant l'enregistrement du coin. Ces valeurs doivent être notées pour être reportées ultérieurement sur les sensitogrammes (sur l'abscisse, log lumination). Si possible, les mesurer en EV plutôt qu'en densité ou en diaphragmes : cela évite de laborieux calculs lors du tracé du sensitogramme.

La source de lumière doit avoir un IRC (indice de rendu des couleurs) suffisant (de l'ordre de 90 à 95). Sa température de couleur doit pouvoir être maîtrisée.

Parallèlement à l'enregistrement du "coin", il est souhaitable d'enregistrer une mire composée pour moitié de noir en dessous de 0% et de blanc au dessus de 100% du signal. Elle servira à mesurer la dynamique du projecteur.
Il peut aussi enregistrer une mire dite "tête de femme" *(voir annexes, "Le développement argentique", "Le contrôle sensitométrique" page 67)* : un visage et une charte de gris. Cette mire doit être collée en début des essais et la copie étalonnée du film. Cette mire permet d'apprécier subjectivement le transfert des images enregistrées à l'écran.
NE PAS OUBLIER DE FILMER UN CLAP D'IDENTIFICATION AVEC LES CONDITIONS DE RÉLISATION DE L'ESSAI !

La question du gris neutre.

Il est communément admis qu'un gris neutre 18% de réflexion doit se situer au milieu de la courbe et qu'il sert de référence pour déterminer la sensibilité. Cela n'est pas toujours vrai. Il n'y a qu'à regarder attentivement les différents rendus selon la sensibilité proposés par l'ALEXA où le gris neutre se balade allègrement sur les différentes courbes, vers le haut ou vers le bas.

En vérité, dès que l'on s'écarte des réglages standard, le gris neutre est susceptible de se situer ailleurs qu'au milieu de la courbe, si bien que notre référence de sensibilité peut très bien être autre, le rendu d'un visage par exemple, ou le rendu dans les hautes lumière et / ou dans les basses lumière.
Par ailleurs, ce que l'on cherche entre autres à définir, c'est un indice d'exposition qui nous convient. Est-il raisonnable de fixer arbitrairement un repère de sensibilité avant même d'avoir commencé nos investigations ? Il se peut même que ce soit le rendu des peaux qui sera déterminant (dans le cas d'un rendu volontairement très contrasté par exemple).

Analyse en projection.

Celle-ci ne peut se faire que si le projeteur (notre "positif") est réglé de façon optimale.
La mesure des plages en projection doit se faire avec le spotmètre qui a servi à la mesure des valeurs réelles du coin.

La dynamique du projecteur peut se régler, en agissant sur les paramètres du projecteur. Il ne faut pas qu'elle soit trop élevée, sans quoi elle peut dépasser nos seuils de lisibilités dans les hautes et basses lumières. Ces seuils dépendent, comme on le

sait, du niveau lumineux de la projection (voir mécanismes de la vision). Un dynamique de 8 stops est généralement suffisante.

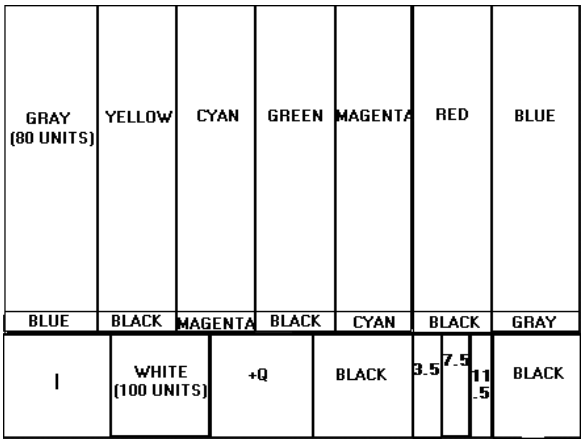
La dynamique inférieure du projecteur par rapport à une caméra très performante ne signifie pas que le projecteur va nécessairement raboter la dynamique de la caméra numérique, pas plus que la dynamique du positif argentique ne rabote la dynamique du négatif *(voir diagramme de Jones page 24).* Cette dynamique restreinte de l'image finale résulte de l'augmentation du contraste (gamma) nécessaire à la production d'une image satisfaisante étant donné les conditions d'observation et les mécanismes de la vision.

Le niveau de la projection doit être vérifié. Pour un blanc 100%, l'éclairement doit tourner autour de 250 lux. Dynamique et niveau peuvent se mesurer à l'aide de la charte composée pour moitié de noir et pour moitié de blanc.

La mire de la SMPTE peut nous aider à affiner ce réglage.

Attention : cette mire est conçue pour la norme de télévision américaine NTSC. Les couleurs peuvent nous paraître improbables.





C'est une mire générée électroniquement. Elle ne donne aucune information de dynamique de la caméra. Par contre, elle permet de régler le "pied" du projecteur ou de l'écran. Il suffit pour cela que le gris très foncé en bas à droite marqués 11.5 soient juste différentiables des deux zones noires qui l'encadrent (black et 7.5). La zone 3.5 doit rester indifférenciable du noir : c'est un infra noir. L'appréciation se fait visuellement.

Lorsque ces noirs et ces gris de la charte SMPTE qui se confondent, il y a évidemment une relation possible avec des noirs mal réglés ou un gamma trop élevé.
Le projecteur étant réglé au mieux, la dynamique connue, on peut projeter et mesurer toutes les plages au spotmètre (avec une marge d'erreur de 1/10 de stop).
Il n'y a plus qu'à tracer la courbe sensitométrique dans un repère orthonormé pour obtenir enfin ce que les fabricants ne nous donnent pas (encore ?) : la manière dont le réel est - transformé - transfiguré - modifié - adapté - altéré - amélioré... par tel ou

tel procédé de fabrication numérique des images ou tel réglage du signal de la caméra.
En abscisse, les log luminations en densité des filtres de notre coin de Goldberg. En ordonnée les brillances, logiquement en candela par mètre carré, et plus simplement en stops ou en EV à partir des mesures faites au spotmètre.

Nous obtenons la courbe produite par l'ensemble caméra - projecteur, avec les réglages particuliers apportés au traitement du signal dans la caméra, les éventuelles compressions, le type de sortie vers le projecteur, etc.

Notes :

1°Le réglage du projecteur et des écrans d'étalonnage doivent se faire une fois pour toutes et ne subir de contrôles que périodiquement. Il est hors de question d'adapter les caractéristiques du projecteur à un mauvais signal ou à étalonnage mal foutu.

2° Il ne faut en aucun cas modifier la courbe à l'étalonnage.
Nous pouvons par contre faire un enregistrement "hors normes" du coin, si notre intention artistique est de travailler "hors normes". Et fabriquer le LUT correspondant.
Disons le autrement : rien ne nous oblige à rester dans les "normes" (du fabricant par exemple), nous avons le droit de créer "nos" normes, si nous pensons que cela convient au film.

Il sera intéressant de comparer les caméras disponibles à l'ESAV, d'en quantifier les réponses à la lumière selon les réglages, d'explorer leurs limites, de les comparer à une RED, une ALEXA...

Application en prise de vues : Zone System, la mesure au spotmètre.

On connait les deux principaux moyens de maîtriser l'exposition.

Mesurer la lumière réfléchie par le sujet. Le principe de cette mesure est de donner un indice d'exposition qui a pour effet, si on ne l'interprète pas, de ramener ce qui est mesurée à un gris neutre global. Ça marche dans des situations de lumière bien "équilibrées". Mais un paysage totalement enneigé deviendra gris moyen de même qu'une forte pénombre riche en dégradés de noir. Dans un intérieur le soir, il suffit de quelques points lumineux un peu éclatants pour que tout le reste s'assombrisse.

La mesure en lumière incidente. On ne mesure que la lumière qui éclaire le sujet. Peu importe qu'il soit globalement sombre ou clair, l'image qu'on obtiendra d'après l'indice affiché par la cellule nous semblera plus ou moins conforme à notre sensation visuelle: les valeurs sombres apparaitront sombres, les claires, claires. La neige restera blanche. Mais ce que l'on ne contrôle pas, ce sont les valeurs extrêmes qui risquent d'avoir une dynamique trop importante pour être correctement enregistrée étant donné le matériel photosensible que l'on utilise : la réflexion sur un plan d'eau, l'ombre sous un arbre en plein soleil. Et surtout, comment exposer en vue d'un résultat qui s'écarte volontairement d'un rendu "normal" ?

Le Zone System est une méthode de mesure inventée par deux photographes américains à la fin des années 1930, Ansel Adams et Fred Archer. Il s'agissait de faire des mesures ponctuelles du sujet, zone par zone, et d'exposer en fonction du résultat qu'ils voulaient obtenir : soit favoriser les basses lumières, soit les hautes ou mieux encore, exposer pour les basses lumières et adapter le temps de développement à la brillance de hautes lumières. La question était d'importance vu la faible dynamique (latitude d'exposition) des pellicules de l'époque.

Cette méthode s'est développée parallèlement au développement des principes de la sensitométrie, de l'augmentation de la latitude d'exposition des pellicules et de la mise au point de cellules photoélectriques, en particulier les spotmètres (appareil qui mesure la lumière réfléchie dans un angle aigu de l'ordre de 2°).
L'usage de ces appareils s'est généralisé sur les plateaux au début des années 1970.

Grâce à un minimum de connaissances sensitométriques, il est possible, dans les cas de figures ou l'on ne maîtrise pas l'éclairage, d'exposer très précisément en fonction de la dynamique des luminations et de la latitude d'exposition du procédé d'enregistrement des images utilisé.
À l'inverse, il est possible d'éclairer de sorte à ce que les différentes zones de l'image apparaissent très exactement comme on le souhaite. Mais pour cela, il faut avoir exploré les caractéristiques sensitométriques du procédé d'enregistrement jusqu'à l'image projetée sur écran. C'est mieux que de se fier au moniteur témoin qui traine sur le plateau.

Une réserve toutefois : ce n'est pas parce qu'une zone de forte pénombre ou de grande luminosité est sensée être lisible selon les données sensitométriques sur lesquelles on se base que cette zone le sera effectivement lisible à l'écran. La dynamique d'une bonne projection et les mécanismes de la vision font que si l'on confronte de fortes pénombres à de fortes clartés dans la même image, l'œil sera incapable de les discerner également.
Le clair obscur, le low key, le high key, cela se construit. Et là, c'est le regard du directeur qui l'emporte sur les machines, aussi sophistiquées soit-elles. C'est à lui de doser les masses et les intensités des différentes zones pour produire les accords, les correspondances, les oppositions ou les antagonismes que l'on souhaite.

Il n'y a rien de plus pathétique qu'un directeur de la photographie qui n'a d'yeux que pour ses appareils de mesure.

Un exemple de spotmètre bien pratique, le Digital Spotmeter de Pentax :

La cellule donne des indices de luminations en EV.
Elle comporte sur son optique de visée, outre les indications indispensables (de haut en bas : sensibilité, temps d'exposition, diaphragme, EV), un échelle de 1 à 10 de part et d'autre du repère triangulaire ND 18%. Cette échelle a été élaborée pour aligner les images de télévision en direct des jeux olympiques de Tokyo en 1964.
Seul les repère 1, triangle et 10 sont vraiment significatifs pour nous.



Le repère 1 correspond à un noir de charte.

Le repère triangulaire à un ND 18%

Le repère 10 à un blanc de charte.

Le repère 5 +/- à une peau claire.

Les autres repères répondent à des caractéristiques techniques des caméras de télévision de l'époque.

La dynamique de cette échelle n'est que de 5 stops, pas plus qu'une bonne charte (qui est une sorte de coin de Goldberg à dynamique limitée). Il est évident que les (bonnes) caméras d'aujourd'hui ont des performances largement supérieures. Mais ces repères 1 et 10 nous permettent de vérifier rapidement si des basses et/ou des hautes lumière sont à coup sûr lisibles. Pour explorer une dynamique plus large, il suffit de vérifier de combien de stop on s'écarte du 18 %, en référence à l'essais sensitométrique.

Note : Il est illusoire de travailler au spotmètre sans un minimum de connaissances sensitométriques.

Sensitométrie et colorimétrie.

L'observation du coin de Goldberg en projection permet d'apprécier la dynamique d'un système d'enregistrement des images, mais elle peut en principe aussi révéler d'éventuelles dominantes, voire des distorsions des couleurs.
Pour les visualiser, il faut procéder numériquement à une séparation trichrome de la courbe N/B. Il faut surtout s'assurer que l'on utilise les filtres de sélection appropriés.

Deux cas de figure peuvent se présenter :

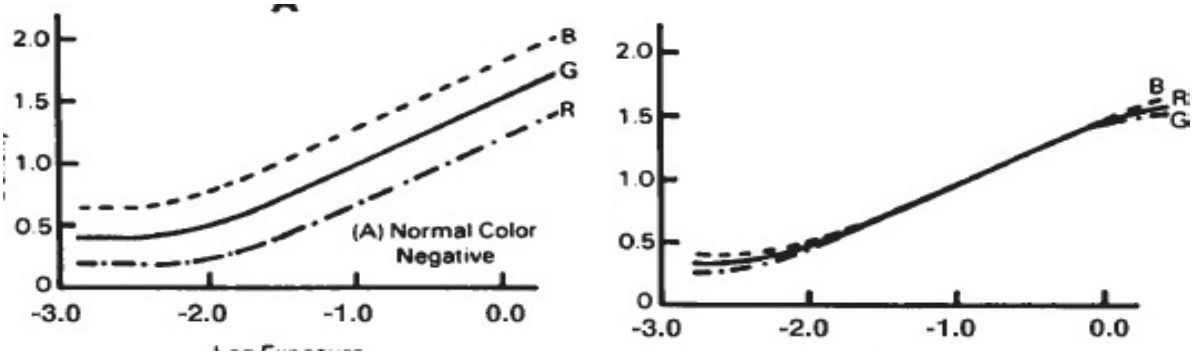
- soit la dominante se répartit de manière homogène sur le coin de Goldberg. Elle est alors due à une différence de sensibilité des courbes entre elles (déplacement latéral des courbes sur le sensitogramme) ou à un décalage vertical (typique de l'effet du

masque sur un négatif argentique) ou encore à une dominante introduite malencontreusement à la prise de vue du coin. Si cette dominante n'est pas excessive, elle se corrige à l'étalonnage par un pré - filtrage unique pour la totalité des rushes.

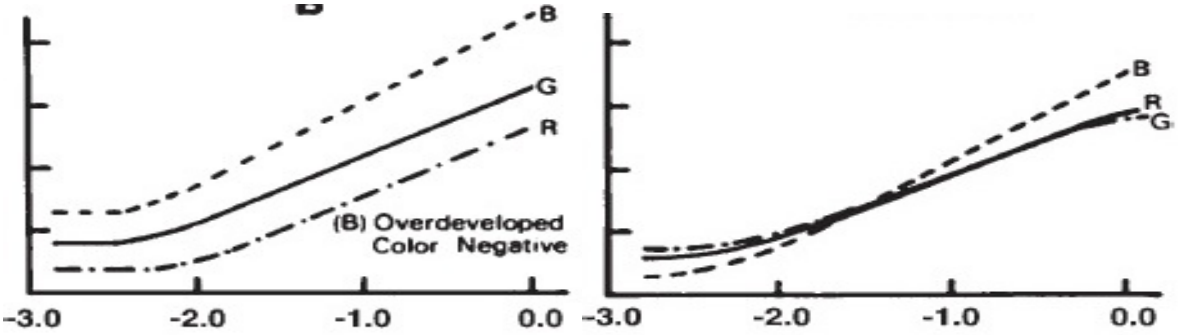
- soit cette dominante ne se répartit de manière non homogène. Cas typique : dominante magenta dans les valeurs claires, verte dans les valeurs sombres, ou l'inverse. Cette dominante est alors due à une différence de gamma entre les courbes. En argentique, elle est impossible à corriger par des voies classiques. En numérique, elle suppose des opérations fastidieuses de corrections opposées hautes lumières - basses lumières.

Il faut, pour obtenir un rendu couleur correct, que les courbes sensitométriques RVB soient au moins parallèles (négatif), ou qu'elles se superposent (positif, inversible).

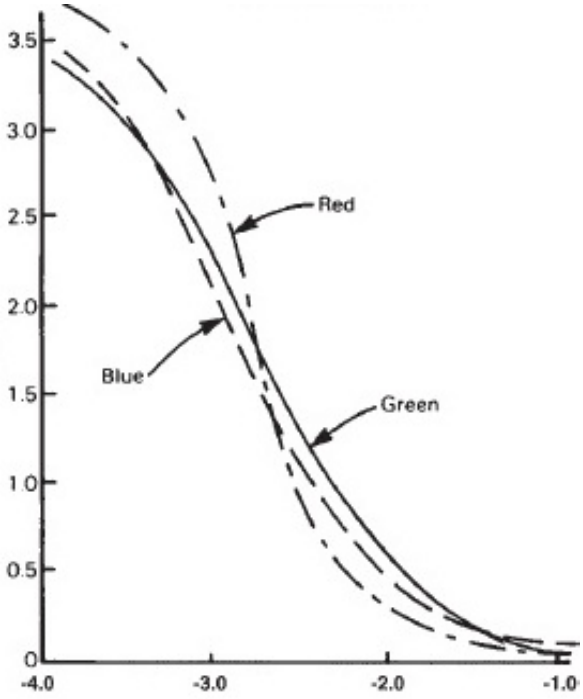
Ainsi, un négatif qui remplit cette condition de parallélisme donnera, après correction des différences de densités de ces courbes dues au masque, trois courbes qui se superposent au mieux :



Mais si une courbe, celle sensible au bleu par exemple, a un gamma supérieur aux deux autres, cela produira une dominante bleu sur le positif dans les hautes lumières et jaune dans les basses lumières.



En inversible ou en vidéo, la même logique prévaut :



Les courbes du vert et bleu ont un parallélisme acceptable et un gamma semblable. Par contre la courbe du rouge a un gamma sensiblement plus élevé. En conséquences, il y aura une dominante rouge dans les hautes lumières et cyan dans les basses lumières. C'est une véritable distorsion du rendu des couleurs.

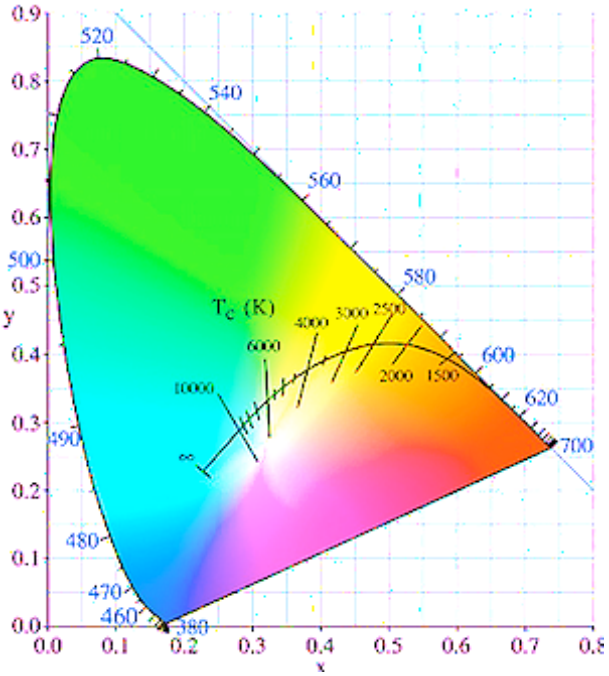
Notons que le parallélisme n'est jamais parfait dans les valeurs extrêmes. Ce n'est généralement pas très sensible dans les noirs, ça peut être gênant dans gris et les blancs

Pour visualiser les trois courbes RVB (ou RGB, dénomination internationale), il faut bien sûr avoir fait au préalable une sélection trichrome de l'image du coin de Goldberg.

Les outils de base de la sensitométrie (coin de Goldberg, densitomètre et spectrophotomètre au mieux ou, par défaut, un simple spotmètre) ne nous permettent pas de pousser plus loin l'investigation colorimétrique. Nous n'avons pas d'autre possibilité que de nous référer à la documentation des fabricants. Ceux-ci travaillent avec des outils autrement plus sophistiqués que les nôtres.

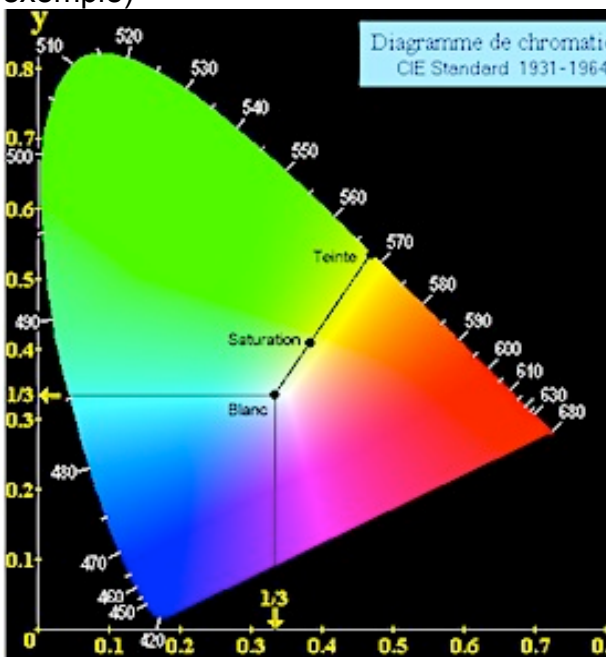
Parmi ces outils, les diagrammes de la CIE (commission international de l'éclairage). Sommairement, ces diagrammes permettent de représenter toutes les couleurs visibles en termes de longueur d'onde et de saturation. Le plus simple d'entre eux, le diagramme de chromaticité CIE X Y (1931) ne représente que des couleurs de même luminosité. Les paramètres X (abscisse) et Y (ordonnée) permettent de localiser les couleurs sur le diagramme.

Diagramme page suivante.



Le long de la courbe en fer à cheval, les longueurs d'ondes de 700 à 380 nanomètres. Sur cette courbe, toutes les couleurs dites pures ou saturées.
Sur la droite, le mélange de bleu et de rouge qui représente les magentas (les pourpres).
Sur la courbe inscrite dans le diagramme, les températures de couleur de la source de lumière blanche sous laquelle les couleurs sont observées (l'illuminant). Le choix de ce blanc de référence influe sur l'apparence des couleurs, et donc sur l'emplacements de ces couleurs sur le diagramme.

Certains diagrammes de la CIE attribuent des longueurs d'onde au magenta. C'est scientifiquement indéfendable, puisque le magenta n'est pas dans le spectre dit de "l'arc en ciel". Mais c'est bien pratique pour identifier (nommer) un magenta. On procède de la manière suivante :
- on trace des droites à partir des longueurs d'onde repérées dans les verts, et on les prolonge sur la droite des magentas en passant par l'illuminant blanc choisi.
- à l'intersection de ces droites avec la droite du magenta, on inscrit les longueurs d'onde des verts correspondants, mais précédées du signe "moins" (- 530 nm par exemple)



Le prolongement sur le pourtour du diagramme de la droite qui relie une couleur au référent blanc définit sa teinte.

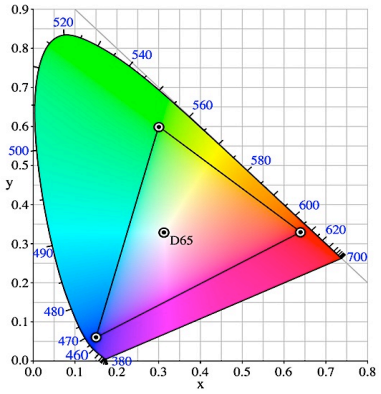
La proximité de cette couleur avec le pourtour définit sa plus au moins grande pureté (saturation).

Le référent blanc a été fixé dans ce diagramme de chromaticité à x = 1/3, y = 1/3. C'est un blanc dont les composantes RGB sont équiénergétiques (en Watt).

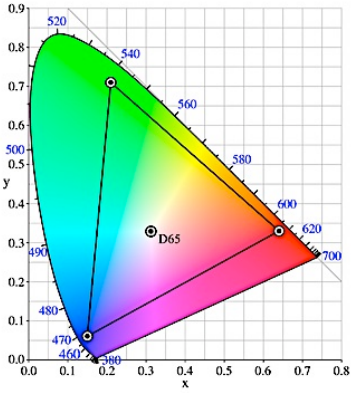
Chaque couleur peut se définir par ses composantes trichromatiques rouge, verte et bleue (système RGB) et sa luminance apparente ou intensité lumineuse subjective. Pour que le diagramme soit complet, il faut introduire cette dernière variable. C'est ce

qui est réalisé par les diagrammes CIE XYZ et CIE xyY. La luminance est alors portée par un droite perpendiculaire au plan.

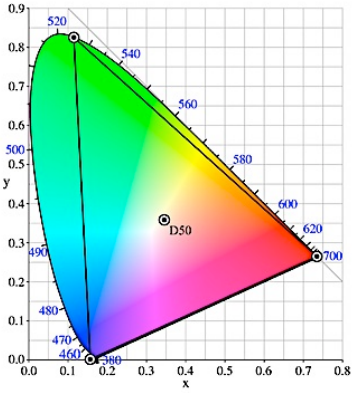
Dès que l'on choisit un système de sélection trichrome particulier, on détermine un triangle qui s'inscrit dans l'espace couleurs du diagramme de la CIE et dont les angles correspondent aux trois primaires choisies. Tous les mélanges de couleurs sont possibles à l'intérieur de ce triangle, mais il est impossible de mélanger des couleurs en dehors de ce triangle. Ce triangle représente un nouvel espace couleurs ou toutes les teintes sont possibles, mais pas les saturations. On appelle ce type d'espace un GAMUT.



sRGB écrans video
35% du diagramme CIE
Blanc 6500 K°



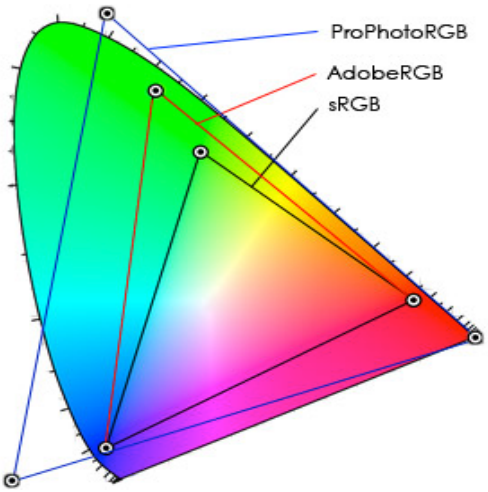
Adobe RGB
50% du diagramme CIE
Blanc 6500 K°



Adobe wide gamut
77,6% du diagramme CIE
Blanc 5000 K°

Chaque gamut utilise des primaires de longueurs d'ondes différentes.
Le défaut de saturation est parfois compensé par une augmentation artificielle de la saturation. Mais cette augmentation agira inévitablement sur des couleurs dont la saturation ne devrait pas être augmenté.

Dans le chapitre consacré aux mécanismes de la vision *(page 11)*, il est dit qu'aucun système de reproduction des couleurs n'est capable de reproduire la totalité des couleurs que nous percevons.
Ce n'est pas totalement vrai, du moins, si on s'en tient à l'aspect strictement informatique de la question.
Une reproduction parfaite des couleurs suppose un espace couleurs qui englobe le diagramme de la CIE. C'est en principe réalisable, ainsi en témoigne l'image de trois espaces, sRGB, Adobe RGB et ProPhotoRGB



L'espace ProPhotoRGB utilise deux primaires verte et bleue "imaginaires". En effet, elles sont en dehors du diagramme de la CIE, en dehors du visible. Ce gamut de KODAK est destiné à la numérisation d'images argentiques avec le moins de pertes possibles. Il suffirait de fabriquer des primaires virtuelles bien au delà du diagramme CIE pour que le diagramme CIE s'inscrive totalement dans cet espace couleur.
Malheureusement, on ne peut pas "fabriquer" physiquement ces primaires virtuelles.

En conséquence, cet espace idéal serait limité par les filtres de sélection trichrome qui couvrent les capteurs en prise de vue. On le sait (*voir page 29*), ils sont loin d'être parfaitement sélectifs et chaque filtrage RGB détermine un gamut spécifique.
Des limitations analogues caractérisent les écrans, les projeteurs et les imprimantes. Ainsi, un écran vidéo calibré sRGB ne recouvre que 35% de la plage couleurs CIE.
Le gamut hypothétique idéal n'est praticable que "virtuellement".

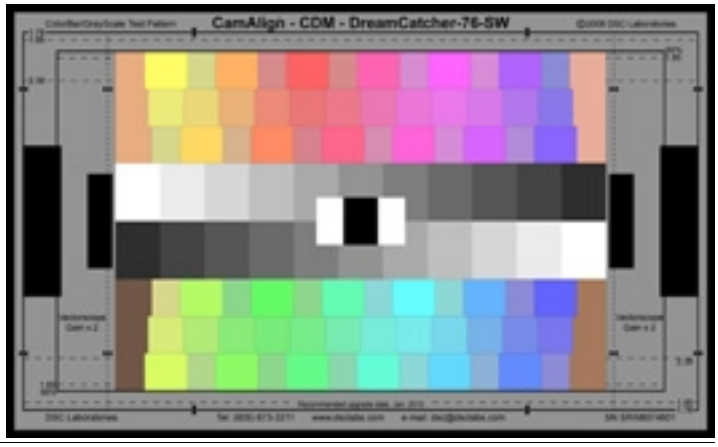
Pour apprécier la fidélité des couleurs, on peut imaginer de filmer un charte de couleurs et se faire visuellement une idée d'une dérive éventuelle dérive de teinte et/ou un défaut de saturation.
Visuellement ? Ça n'a pas de sens. Cela supposerait que l'on ait un souvenir scientifiquement exact des couleurs de la charte. Or, on sait que ce n'est jamais le cas, même en ce qui concerne des couleurs qui font partie de notre environnement quotidien : les peaux, le ciel bleu, la verdure (*voir Kowaliski page 13*)
Nos conclusions ne seront significatives que si nous avons au préalable mesuré au spectrophotomètre chaque plage de la charte pour pouvoir la comparer à une mesure semblable sur écran. Et cela relève d'un travail dans des conditions de laboratoire très strictes qui ne nous sont pas vraiment accessibles.

Ci-après, deux chartes.

La Macbeth ColorCheker, qui a l'avantage d'être assez abordable mais l'inconvénient d'avoir un dynamique assez réduite et de mal vieillir. Les plages sont repérées dans l'album de couleurs de Munsell et dans le diagramme CIE xyY.

Une des nombreuses chartes de ChromaDuMonde, ayant une belle dynamique et un nombre impressionnant de couleurs, dont quatre groupes de couleurs chair. Protégée par un verni spécial, elle a une belle durée de vie un prix de l'ordre de 1000 $. Elles répondent toutes aux normes UIT Rec. 709.





Mackbeth ChromaDuMonde.

Une charte de type Macbeth glissée dans le dispositif scénique d'un essai de key light nous permettra de relativiser nos sensations subjectives, grâce notamment à la présence des six plages sensées représenter les trois primaires et leurs complémentaires, mais guerre plus. Ne prétendons pas en tirer des conclusions scientifiques !

Paradoxalement, c'est en noir et blanc qu'une charte de couleurs sera la plus intéressante : elle nous donnera une idée de la sensibilité chromatique de notre chaîne.

Pour mémoire, la sensibilité chromatique d'une pellicule noir et blanc est sa capacité à traduire par des densités tout ou partie des couleurs visibles. Les toutes premières pellicules n'étaient sensibles qu'aux bleus et aux ultraviolets. Ensuite sont apparues les pellicules orthochromatiques dont la sensibilité était étendue dans les verts, jaune-verts, en enfin les panchromatiques, sensibles à la totalité du spectre, mais de manière variable selon les fabricants.
En utilisant des filtres colorés à la prise de vue, on peut modifier à loisir cette sensibilité chromatique.

Conclusions générales.

Les essais sensitométriques peuvent être envisagés de deux manières :

- Soit on cherche à vérifier si les performances d'une chaîne de fabrication des images sont conformes aux normes, sur le plan de la dynamique et sur le plan colorimétrique, en tenant compte des limites qui ont été formulées. On peut aussi comparer les potentialités de plusieurs chaînes. Ce type d'investigation est purement technique.

- Soit on cherche à fixer les paramètres image (dynamique, gamma, allure de la courbe, espace couleur, éventuelle dominante, etc) qui nous permettront d'atteindre nos objectifs artistiques, sachant que ceci n'est possible que si nous connaissons les potentialités de la chaîne.

Dans ce dernier cas de figure, notre travail consiste souvent à "dégrader" les potentialités de la chaîne de fabrication, à les "distordre". Décoller les noirs et limiter la

luminance des blancs pour obtenir un rendu plus doux par exemple, ce qui équivaut à ne pas utiliser toute la dynamique du projeteur. On peut au contraire rechercher une sensation de contraste très violent (ce qui correspond à ne pas utiliser toute la dynamique de la caméra). On peut décider de désaturer, de sursaturer, de faire dériver les couleurs, de rechercher un rendu proche des premiers procédés Technicolor ou d'un téléphone portable, des autochromes des frères Lumière, de la palette d'un peintre ...
Paradoxalement, plus la chaîne est riche de potentialités, plus les possibilités de "dégradation" se feront tout en nuances. Dans de rares cas, séquence Handycam, téléphone portable ou webcam par exemple, on peut se poser la question de savoir s'il n'est pas plus rentable de travailler directement avec ce type d'appareils de prise de vue. Attention dans ce cas au workflow, à la compatibilité des codecs avec ce genre de tripatouillages.

Il faut répéter ici que la qualité des images ne se définit pas qu'en termes de ressemblance au modèle. Si les caméras haut de gamme nous procurent une dynamique égale, voire supérieure à notre système de vision, aucune ne peut reproduire à l'identique les couleurs comme nous les voyons dans le réel. S'ajoute à cela que le rendu chromatique varie d'un fabricant à l'autre, voir d'une caméra à l'autre chez un même fabricant (comme en argentique).
Avec les conséquences suivantes :

- Deux caméras peuvent produire deux couleurs différentes d'un même objet coloré.

- On peut aligner deux caméras de sorte à ce qu'elles enregistrent les couleurs d'une charte en produisant des couleurs semblables sans qu'il en aille de même pour toutes ou certaines couleurs qui ne sont pas présente dans la charte.

- En prise de vue, la couleur apparente d'un objet peut varier de manière flagrante en fonction de l'éclairage (température de couleur par exemple, ou selon l'éclairement). Lorsque cette différence est liée à la température de couleur ou à l'indice de rendu des couleurs de la source de lumière, la faculté que nous avons de neutraliser grandement cette différence dans le réel n'opère plus face à une image.

- Plus surprenant, deux objets peuvent nous sembler avoir la même couleur dans le réel et être traduit per telle caméra par deux couleurs différentes.

Alors ? Toutes les caméra (et les pellicules argentiques) sont-elles à jeter ? C'est une hypothèse.
Mais on peut aussi tirer parti de ces imperfections de rendu et choisir une caméra plutôt qu'une autre parce que l'espace couleurs de l'une semble plus favorable au film envisagé que l'autre, même si elle est techniquement moins performante. On ne fait pas autrement en argentique

A-t-on jamais reproché aux grands peintres de travailler dans des espaces couleurs réduits et très personnels ?

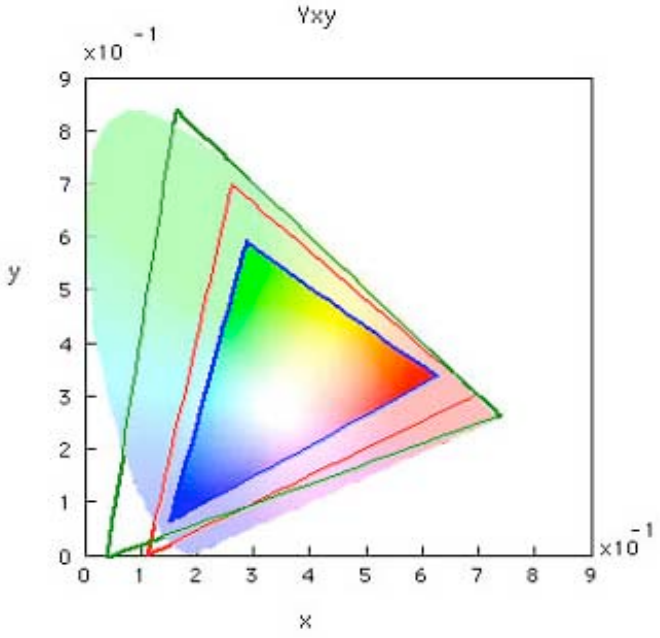
Annexes.

Notes à propos de l'étalonnage :

Un travail exigeant devrait se faire systématiquement en salle de projection équipée d'un projecteur normalisé. Mais malheureusement on étalonne trop souvent au pire sur un écran d'ordinateur, au mieux sur un écran calibré (le plus souvent par manque d'argent).

Avant toutes choses, il faut alors régler l'écran de sorte à obtenir un même dynamique qu'en projection et régler la luminance de sorte à ne pas éprouver de fatigue visuelle, tout en s'assurant que l'image du coin de Goldberg soit lisible comme en projection (ni plus ni moins de plages).
Il faut aussi s'assurer que l'espace colorimétrique (le gamut) de l'écran soit au moins égal à celui de la projection. S'il est plus large, ce n'est pas grave : le moniteur ne pourra pas "inventer" des couleurs qui n'existent pas dans les images. S'il est moins large, on a toutes les chances d'agir malencontreusement et de manière incontrôlable sur des couleurs devenues invisibles à l'écran, mais bien visibles en projection, de provoquer des sursaturations et des dérives de couleurs par exemple.

L'image suivante propose trois gamuts différents. Le plus petit, en bleu, est celui d'un tube cathodique BARCO, tube qui a longtemps été "LÀ" référence. Le moyen, en rouge, est un gamut nommé EKTASPACE mis au point par le photographe américain Bruce Fraser destiné à scanner des diapositives EKTACROME de KODAK. Le plus grand, en vert, le gamut conçu par Kodak : ProPhotoRGB. Il est évident que la petite fenêtre du Barco ne peut pas visualiser tout l'espace EKTACROME et encore moins l'espace ProPhotoRGB.



Notons que les gamuts EKTASPACE et ProPhotoRGB contiennent des couleurs "virtuelles", c'est à dire des couleurs qui sortent du diagramme de la CIE, et qui donc

n'appartiennent pas au visible. C'est une manière de couvrir mieux le diagramme de la CIE. Opération impossible en analogique !

Il y a d'autres écueils à éviter.

- L'image est petite. On la regarde sous un angle réduit. La perception des contrastes en est faussée. Ce n'est pas le cas en projection car l'image est suffisamment grande pour créer un champ environnant autour de notre centre d'attention visuelle.

- On regarde une lampe ! Elle est aveuglante, à la longue. Si l'on est dans le noir total, il y a un effet d'éblouissement. S'il y a une lumière ambiante, elle peut être trop chaude ou trop froide et fausser notre perception des couleurs. Trop forte, elle va délaver (flasher) l'écran et on peut avoir tendance à augmenter le contraste pour compenser visuellement cet effet. En projection, on est consterné par un contraste excessif et on est tenté d'accuser le projecteur.
Pour y remédier, il suffit d'éclairer le fond (blanc ou gris) derrière l'écran de sorte à obtenir un gris neutre par rapport à la brillance (luminance) de l'écran de même température de couleur. On reconstitue ainsi un champ environnant calibré et contrôlable. Il nous permet de garder en permanence une référence visuelle dans le coin de l'œil.

L'étalonnage numérique permet de très nombreuses manipulations de l'image qui peuvent nous conduire à modifier involontairement les caractéristiques sensitométriques du signal, tant en termes de dynamique qu'en de sensation de contraste et de couleurs. Pour minimiser ce risque, outre la création d'un champ environnant de référence derrière l'écran, il est prudent de se référer à une image de référence (issue de l'essai de key light par exemple) pour pouvoir apprécier subjectivement un éventuel dérapage involontaire.

Note: La lumière de projection, en argentique comme en numérique, est produite par une source xénon dont la température de couleur est de 5400 K°. Il ne faut donc pas régler trop bas la température de couleur de l'écran, même et surtout si le rendu couleur semble plus satisfaisant.

Le développement argentique.

Le développement noir et blanc.

La pellicule argentique noir et blanc est composée de minuscules cristaux d'halogénures d'argent dispersés dans une fine couche de gélatine servant de liant. Le tout est couché sur un support (verre, papier, pellicule).
Sous l'action de la lumière, les cristaux subissent une première décomposition (ou réduction) en proportion de la quantité de lumière reçue par chaque cristal. Cette image reste invisible.
C'est l'image latente.
- Pour devenir visible, cette image latente doit être développée dans un bain chimique approprié : le révélateur. Ce bain a pour action d'achever la décomposition des cristaux exposés suffisamment à la lumière : ils sont réduits à des grains d'argent purs.
- Reste les cristaux non exposés ou insuffisamment exposés. Ils doivent être éliminés.
C'est la fonction du bain fixateur.
- Entre ces deux bain, un bain dit d'arrêt : il bloque le développement et empêche des résidus de révélateur de polluer le bain de fixage.
- Un dernier bain de rinçage élimine toute trace chimique du fixateur.

Ces quatre opérations se font dans le noir et nécessitent un contrôle rigoureux des durées de traitement et des températures ainsi qu'un contrôle chimique des bains.
Le positif peut se traiter dans un lumière de sécurité inactinique rouge ou sodium.

Le développement couleur, dit développement chromogène.

La pellicule est constituée de trois couches argentiques noir et blanc superposées, sensibilisées respectivement au rouge, au vert et au bleu. Chacune de ces couches est associée à des coupleurs susceptibles de former des colorants cyans, magenta et jaunes. *(voir : coupe schématique d'une pellicule couleur page 29)*

Étapes du développement couleur.

- Pré-bain. Il dissous la couche anti halo. Celle-ci sera essuyée mécaniquement.
- Révélateur chromogène. Il développe les trois couches argentiques. En même temps, il se forme des colorants C,M,Y à partir des coupleurs associés aux grain d'argent exposés.
À ce stade, deux types d'images sont présentes dans le négatif : trois images noir et blanc constitués de grains d'argent et trois images couleur constitués de colorants.
- Un bain d'arrêt.
- Un lavage.
- Un bain de blanchiment. Il transforme les trois images noir et blanc en nouveaux cristaux d'halogénures d'argent. Il n'y a plus de composantes noir et blanc dans l'image, mais il reste des halogénures d'argent sous forme cristalline.
- Un fixage. Il dissous les halogénures d'argent non ou insuffisamment exposés ainsi que ceux générés par le blanchiment. Il ne reste que les colorants CMY.
- Un bain de lavage.

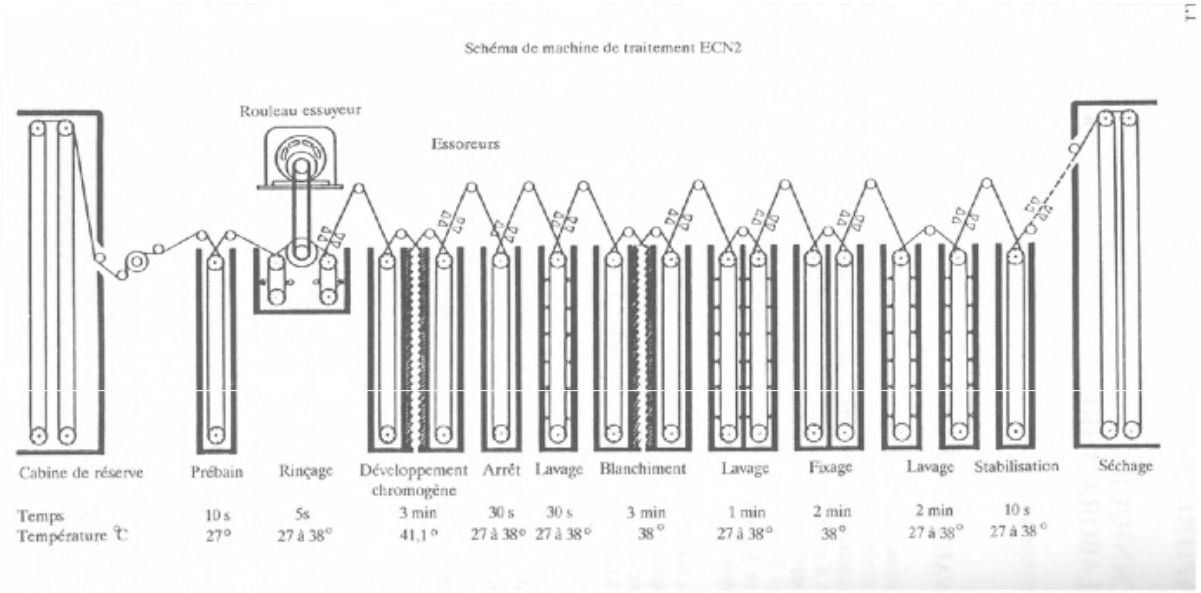
- Un bain de stabilisation des colorants.

Toutes ces opérations s'effectuent dans le noir et nécessitent un contrôle sensitométrique, chimique, des températures et des temps de chaque bain.
Le positif peut se développer dans une lumière inactinique sodium.

Le contrôle sensitométrique :

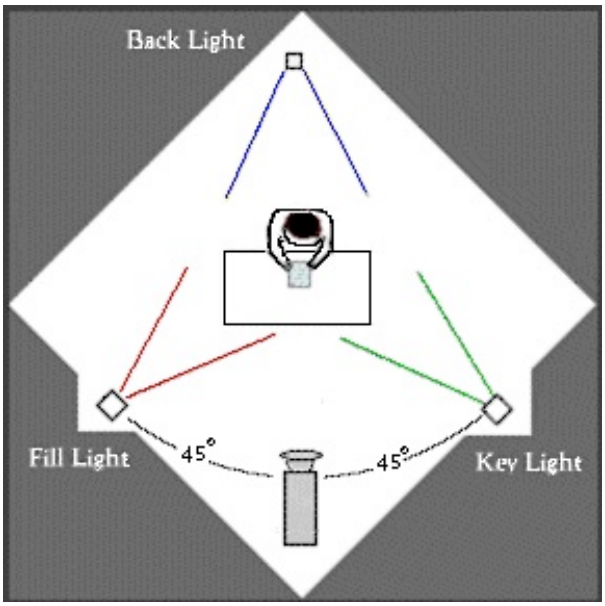
Il s'effectue de manière suivante : un bout de pellicule sur laquelle a été exposé une mire dite "tête de femme" est accrochée à chaque bobine. Elle est constituée d'un visage de femme et d'une charte de gris. Après développement, la charte est mesurée pour comparaison avec les normes sensitométrique du laboratoire et du fabricant. Le visage permet une appréciation subjective de la qualité du développement en projection. Des coins sensitométriques des différentes pellicules fournis par le fabricant sont régulièrement développés dans les mêmes bains pour un contrôle plus rigoureux.
On a tout intérêt à adopter cette logique de contrôle en numérique.

Ci-après, le schéma d'une développeuse, 4 à 5 de long.



L'essai de key light.

"Key light" est un terme anglo-saxon qui signifie littéralement "lumière clef". On peut le traduire par "lumière principale" ou "attaque" (de lumière) : la lumière à partir de laquelle on structure un éclairage complexe. En tapant ce terme sur Google, on trouve des tas de recettes académiques sur le thème : *" La lumière ? Mais c'est bien simple !"*. Celle-ci par exemple :



Le key light est à 45° de l'axe de prise de vue.

Le fill light (lumière de "remplissage") est symétrique au key light. Il a une intensité de 1/2 à 1/4 du key light.

Le back light (contre jour) est en face de la caméra, en plongée. Il vaut 2 x le key light.

Procéder de la sorte vous garantit double ombre du nez, double ombre du personnage sur le fond, de grandes difficultés pour mettre une perche, apparence artificielle des visages et des corps, comme s'il y avait deux attaques opposées, l'une plus forte que l'autre. Et pourquoi faudrait-il absolument un contre jour ?
Passons outre.

L'essai de key light est destiné à vérifier la sensibilité du système d'enregistrement des images, à explorer sa dynamique (latitude d'exposition), à apprécier subjectivement le rendu chromatique, la texture, le grain et/ou le bruit, l'apparition du voile. Pour ce faire, on ne se contente pas d'exposer à la sensibilité nominale, mais on explore aussi la sous-exposition et la surexposition par bons de 1 stop en essayant de couvrir au moins +/- 5 stops. Chaque prise doit avoir un durée de +/- 20 secondes pour pouvoir être analysée confortablement en projection. Il est conseillé de clore l'assombrissement et l'éclaircissement de l'image par un retour à la sensibilité nominale.

Dans sa version la plus radicale, le sujet est constitué d'un personnage cadré micuisses, d'une charte de couleurs et d'une charte de gris, d'un clap d'identification où figure aussi le diaphragme affiché. Une seule source de lumière, généralement un Fresnel, suffisamment puissant pour atteindre un diaphragme de 5.6 voire 8 pour la sensibilité nominale, disposé latéralement et en légère plongée de sorte à obtenir un modelé sur le visage sans que les yeux ne soient masqués par l'ombre des arcades sourcilières. L'assai se fait dans un local sombre pour minimiser les réflexions parasites. Le fond est constitué de quelques éléments noirs, blancs, colorés. Ce fond ne

doit pas produire une impression globalement trop sombre au trop claire pour ne pas nuire à l'appréciation visuelle en projection.

De nombreuses variantes sont possibles, chaque directeur de la photographie se forgeant sa propre méthode à force d'expériences, l'important étant la lisibilité.

Quelques variantes :

- Adoucir le Fresnel (diffusion) ou utiliser une source plus douce.
- Ajouter de la lumière d'ambiance (mandarine en réflexion sur polystyrène), plutôt à la face (de l'ordre de 3 stops en dessous du key light), pour contrôler le contraste entre partie éclairée et partie ombrée du visage.
- Mettre deux personnages dans l'image, un de peau claire, l'autre de peau sombre.
- Ne pas se contenter d'un fond abstrait, mais suggérer un lieu (bureau, salon, chambre).

Il est vivement conseillé de ne pas construire un éclairage complexe, un éclairage à effet, cet essai doit rester ce qu'il est au départ : le pendant expérimental visuel de l'essai sensitométrique. On peut faire des essais d'éclairages, mais par ailleurs, et de préférence après avoir tiré les conclusions de l'essais de key light.

Quelques sites, sources et ouvrages qui ont été abondamment consultés.

Liste non exhaustive.

KARINE AULNETTE : "Mode Film et Caméras Numériques", 2007, WWW.ens-louis-lumière.fr

CHARLIE LENORMAND : " Du grain au bruit : vers une sensitométrie numérique", 2006, WWW.ens-louis-lumière.fr

REMY PIGEARD : "Multi Formats Numériques : vers une optimisation sensitométrique" - 2010 WWW.ens-louis-lumière.fr

MARTIN ROUX : "Persistance", 2012, WWW.ens-louis-lumière.fr

Cours 3 et 8 de CLAUDE GABRIEL, Haute École Libre de Bruxelles, WWW.claudegabriel.be

JACQUES VERREES : "Sensitométrie Noir/Blanc et Couleur, WWW.jacobel.net

La Sensitométrie : http://data0.eklablog.com/ptitpregh/mod_article3569907_8.pdf?6946

ARRI Group, Downloads, en particulier " ALEXALOG C Curves" et "ALEXA test charts".

KODAK : http://motion.kodak.com/motin/Products/Production/index.htm

WWW.galerie-photo.com/sensito-numerique.html

Le blog de la trichromie : http://trichromie.free.fr/trichromie/index.php?post/2010/04/01/VFIII

Le site de la Commission Supérieure Technique de l'Image et du Son (www.cst.fr) documentation - dossiers techniques.

WWW.blog-couleur.com : diagramme de la CIE, gamma, colorimétrie, photométrie, technique photo, télévision.

Wikipedia : wikipedia.fr et wikipedia.org. Le site anglophone (.org) est beaucoup plus riche d'informations. Tous les thèmes sont traités, y compris "diagramme de Jones", "Zone System", aspects historiques...

Sony Global - Technology - xvYCC
Espace couleurs, espace xvYCC, gamut, diagramme CIE...