



ÉTUDE SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES CAPTEURS

*Groupe de travail
du Département
Image de la CST*

JACQUES GAUDIN
ALAIN SARLAT
GILLES ARNAUD
YANN CAINJO
BAPTISTE MAGNIEN

La CST est la première association de techniciens du cinéma et de l’audiovisuel française. Née en 1944, elle défend le travail collectif et promeut l’excellence technique pour permettre l’aboutissement de la vision de l’équipe artistique. La CST respecte cette vision et en garantit la traduction sur l’écran pour l’ensemble des spectateurs.

À ce titre, la CST accompagne les salles de cinéma qui souhaitent proposer une expérience optimale à leurs spectateurs et assure la Direction technique de plusieurs festivals, dont le Festival International du Film de Cannes. La CST est également devenue la maison des associations pour la quasi totalité des associations de professionnels de l’industrie cinématographique.

Les actions de la CST se traduisent enfin par l’organisation de groupes de travail pour définir les bonnes pratiques professionnelles qui deviendront des recommandations techniques, parfois même adoptées en normes et standards. Ces travaux se déroulent au sein des cinq Départements de la CST : Production/ Réalisation, Son, Post-production, Diffusion-Distribution-Exploitation et le Département Image qui a réalisé cette présente étude.

La CST est une organisation principalement financée par le CNC.

CST – COMMISSION SUPÉRIEURE TECHNIQUE DE L’IMAGE ET DU SON

22/24 AVENUE DE SAINT-OUEN – 75018 PARIS

www.cst.fr

Délégué général : Baptiste Heynemann
Responsable de la communication : Myriam Guedjali
Maquette : fabiennebis.wixsite.com/graphisme
Février 2019

ÉTUDE SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES CAPTEURS

*Groupe de travail
du Département Image de la CST*

SOMMAIRE

1 INTRODUCTION	6
A BUT DE CETTE ÉTUDE	6
B PROTOCOLES ENVISAGÉS	8
2 DONNÉES DU PROBLÈME	9
A IMPORTANCE DE LA TAILLE DU CAPTEUR	9
1 Rendement quantique	10
2 L'étendue utile	10
3 Profondeur de champ	10
4 Bruit	11
5 Diffraction	11
6 Fonction de transfert de modulation (FTM)	13
B TECHNOLOGIES DES CAPTEURS	13
1 CCD et CMOS	13
2 FSI et BSI	14
C SÉPARATION DES PRIMAIRES	14
1 Séparation à prismes (tri CCD ou tri CMOS)	14
2 Séparation par matrice de filtres colorés (mono capteur)	15
3 Importance du dématriçage	15
3 MIRES DE CONTRASTE, TYPES DE FICHER ET OUTILS D'ANALYSE	16
A LES MIRES DE CONTRASTE	16
1 Les mires Xyla	16
2 Arri Dynamic Range Test Chart DRTC-1	16
3 TE264	16
4 La mire réalisée par Alain Sarlat à l'École Nationale Louis Lumière	16
B LES DIFFÉRENTS TYPES DE FICHER RAW	16
1 Les fichiers DNG	17
2 Les fichiers Arri RAW	17
3 Les fichiers RAW Panasonic	18
4 Les fichiers RAW SONY	18
5 Les fichiers RAW RED	18
C LES OUTILS LOGICIELS D'ANALYSE UTILISABLES	19
1 Matlab	19
2 GNU Octave	19
3 RAW Digger	19

4 MÉTHODOLOGIE	20
A MÉTHODES DE LA NORME ISO 12232	20
1 Méthode du plan focal	20
2 Méthode basée sur la moyenne arithmétique de la luminance de la scène	21
B MÉTHODE DÉVELOPPÉE PAR ALAIN SARLAT	21
1 Estimation de la sensibilité	22
2 Estimation de l'étendue utile	23
C MÉTHODE DÉVELOPPÉE PAR BAPTISTE MAGNIEN	25
1 Dispositif expérimental	25
2 Tableaux et courbes	26
3 Analyses et interprétations	28
D DÉTERMINATION DE LA SENSIBILITÉ SELON LES DONNÉES CONSTRUCTEUR	28
E LA CARACTÉRISATION DU BRUIT	29
F LA MESURE DE RÉPONSE SPECTRALE	29
5 CONCLUSION	33
6 ANNEXES	34
A INDICES EV / IL	34
1 Calcul de l'indice EV pour 100 ISO	34
2 Rapport de contraste EV et linéaire	34
3 Table des indices EV pour 100 ISO (Sekonic Cine Master)	35
B CALCUL DE LA SENSIBILITÉ ISO D'UN FILM NÉGATIF COULEUR	36
C NORME ISO 12231 VOCABULAIRE	36
1 Gain	36
2 Fonction incrémentale du gain	36
3 Incrémentation du signal de sortie	36
4 Bruit de sortie	36
5 Limite d'exposition maximale	36
6 Limite d'exposition minimale	36
D PIXEL	37
7 BIBLIOGRAPHIE	38

1 INTRODUCTION

A BUT DE CETTE ÉTUDE

Avec l'avènement du numérique, il est devenu indispensable, pour le directeur photo, de connaître les caractéristiques du capteur de la caméra qu'il utilise.

Pour évaluer ces caractéristiques, différentes approches peuvent être envisagées :

- Soit une approche subjective basée sur une scène avec une silhouette lumière permettant d'évaluer un rendu artistique mais qui ne vaut que pour des essais particuliers ;
- Soit une approche objective basée sur des mesures et permettant de tracer une courbe sensitométrique aisément diffusable.

Le but de cette étude est finalement modeste : comment réaliser, pour un capteur, l'équivalent de la courbe caractéristique que nous réalisons en argentique ?

Cette courbe apportait à l'opérateur des informations indispensables : étendue utile, sensibilité, latitude de pose, défauts éventuels. Ces informations n'étaient établies que pour un couple stock d'émulsion/labo, et pouvaient donc varier avec un autre stock d'émulsion du même modèle et de la même marque et un autre labo, voire le même labo quelques mois plus tard.

Que signifie « sensibilité de capteur » et peut-on utiliser sa cellule pour poser une image numérique ?

Alors qu'en argentique, il suffisait de changer d'émulsion pour changer de type de capteur, en numérique nous sommes pour ainsi dire prisonniers des caractéristiques du capteur : étendue utile, sensibilité et colorimétrie. Il est donc indispensable de les définir rigoureusement. Le parallèle avec la sensitométrie argentique constitue donc notre base de départ pour déterminer un protocole qui nous donnera des résultats objectifs.

Par ailleurs, le grain d'une émulsion constitue une trame aléatoire tandis que la structure des photosites d'un capteur constitue un réseau géométrique régulier ce qui peut provoquer des effets indésirables de moirage sur-

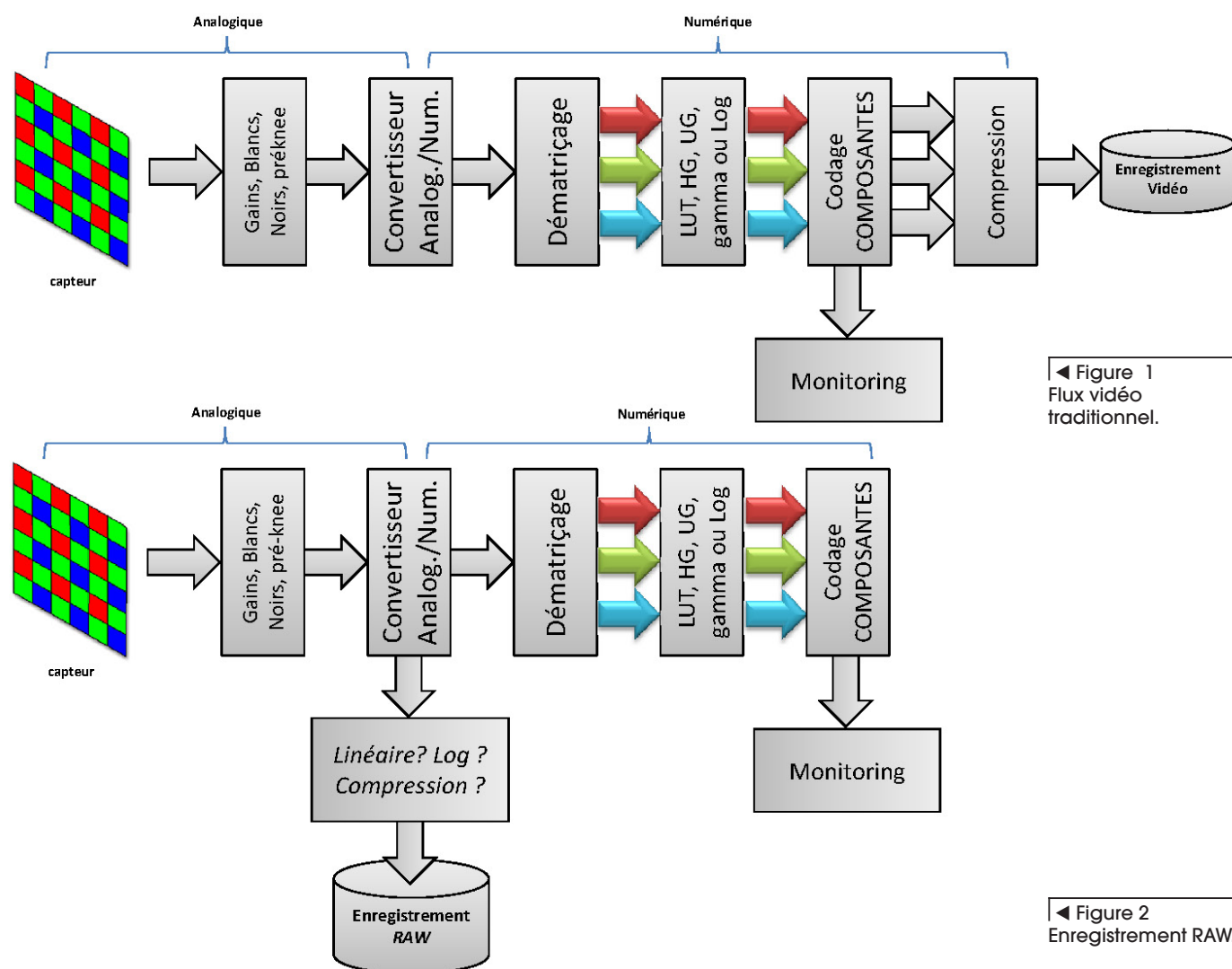


Figure 1
Flux vidéo traditionnel.

Figure 2
Enregistrement RAW.

tout en l'absence d'un filtre anti-aliasing adapté. Il faut donc se faire à l'idée que la vidéo numérique constitue un média différent de l'argentique et de la vidéo traditionnelle, même si des rappels et des similitudes entre les uns et les autres existent.

Les caméras numériques peuvent être utilisées principalement de deux manières : soit pour produire un enregistrement vidéo, encodé en composantes vidéo numériques et compressé, avec toutes les restrictions que cela comporte, soit pour produire une image plus riche, de type « cinéma », qui demandera un traitement en post-production : c'est le mode RAW. Il va de soi que c'est cette seconde option qui permettra de juger de toutes les qualités d'une caméra, le mode vidéo constituant un nivellement de la dynamique et de la richesse de l'image.

En sortie du capteur, la lecture analogique des tensions issues des photosites est convertie en valeurs numériques et codée. À partir de là, l'enregistrement du signal peut se faire de deux manières :

- L'information est totalement « développée » dans la caméra, encodée en mode composantes et compressée dans un fichier vidéo (figure 1) ;
- L'information est écrite plus ou moins directement, soit en linéaire, soit en log, avec parfois même une compression, dans un fichier dit RAW (figure 2). La caméra renferme ainsi une partie du labo sans que la documentation soit toujours claire à ce sujet. La lecture peut s'effectuer ensuite, soit dans un flux vidéo numérique qui transmet en réalité des valeurs binaires, soit en lisant directement les valeurs numériques du fichier RAW.

L'enregistrement RAW permet de préserver au maximum les informations de l'image en évitant de les dégrader par un traitement dans la caméra, celle-ci n'étant rien d'autre qu'une station graphique portable, et donc très optimisée car devant traiter, en temps réel, un grand nombre d'opérations : dématricage, matricage primaire (matrix), gammas, knee, correction de contours, codage vidéo composantes (Y,Cb,Cr), compression etc. En mode RAW toutes ces opérations seront traitées a posteriori sur des stations graphiques d'étalonnage plus efficaces, infiniment plus souples et moins limitées en ressources, et travaillant en RGB et non pas en codage composantes Y',Cb, Cr, codage destructeur de l'espace colorimétrique qui se trouve en effet divisé par 6 (figure 3). Ce codage, inventé au départ pour la télévision, est peu adapté aux exigences de l'étalonnage du cinéma numérique.

Les buts de cette étude sont donc les suivants :

1. Déterminer l'étendue utile du capteur.
2. Caractériser le rapport signal sur bruit.
3. Déterminer la sensibilité du capteur.
4. Déterminer la sensibilité spectrale du capteur et la Température de Couleur générant le moins de bruit.

La méthode utilisée s'inspire de la sensitométrie argentique : exposition du capteur à travers une mire de contraste pour réaliser un sensitogramme numérique, relevé de valeurs, tracé de la courbe, puis interprétation de cette courbe.

Accessoirement, cette étude cherche également à tordre le cou à certaines idées reçues et à faire bouger les lignes par rapport à certains fabricants qui ne communiquent qu'assez peu, voire pas du tout, sur la structure de leur fichier RAW.

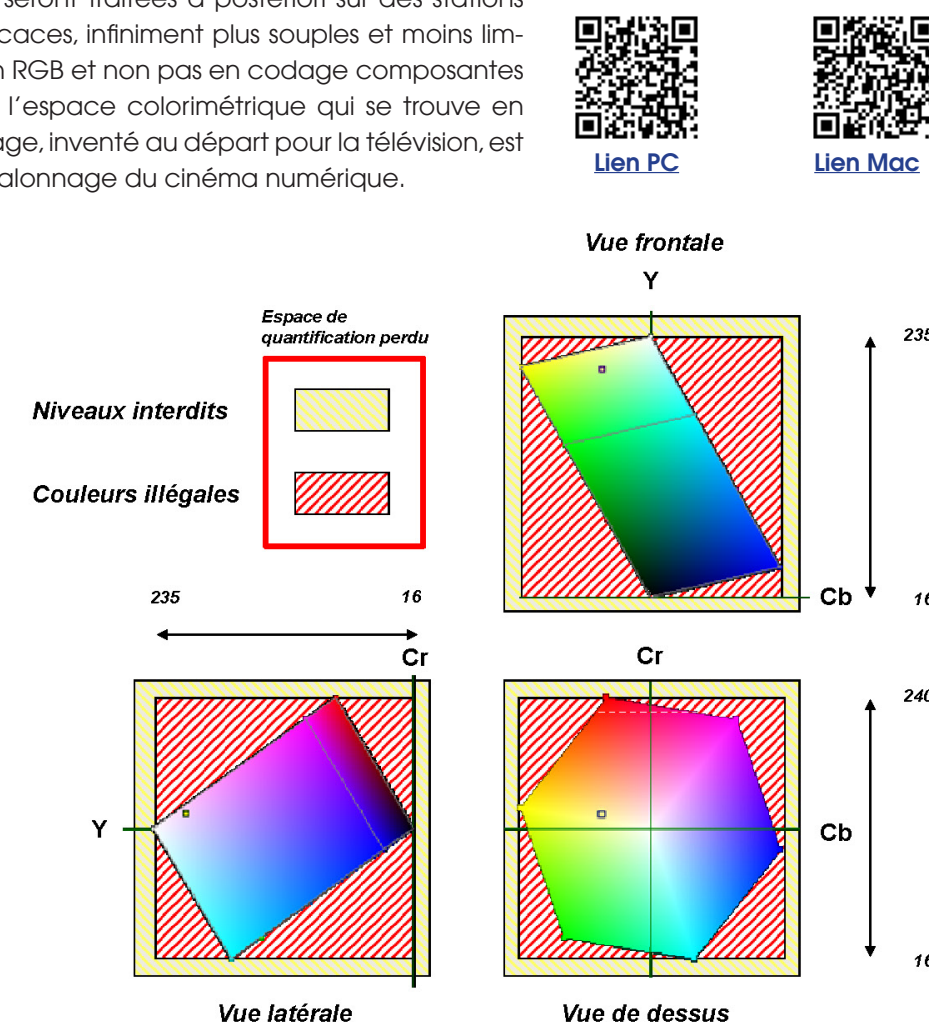


Figure 3
Illustration de la réduction de l'espace de quantification d'une image codée en composantes vidéo. Toutes les parties hachurées du cube de quantification Y, Cb, Cr correspondent à de l'espace perdu :
RGB 8 bits 16 777 216 couleurs
YCbCr 8 bits 2 728 790 couleurs

B PROTOCOLES ENVISAGÉS

Le protocole envisagé, même s’il est ouvert à des évolutions futures, doit prendre en compte un certain nombre de contraintes :

- Les capteurs sont de tailles différentes, du micro 4/3 jusqu’au 24 x 36 mm voire plus ;
- On ne peut pas opérer par contact, contrairement au film, à cause de la présence de divers filtres, des lentilles gaufrées, etc.

Deux approches peuvent être envisagées, avec ou sans objectif :

- La méthode avec objectif consiste à projeter l’image d’une mire sur le capteur via un système optique, le plus simple étant d’utiliser un objectif présentant peu de flare, à l’ouverture requise, et dont les caractéristiques sont par ailleurs disponibles et mesurables. Cette méthode avec objectif présente l’intérêt d’enregistrer l’image d’une mire comportant de nombreuses zones pouvant couvrir jusqu’à 21 EV en une seule passe, d’où un gain de temps considérable et un repérage très simple, mais elle a l’inconvénient d’intégrer la transmission spectrale de l’objectif ainsi que ses éventuels défauts, dans la mesure. L’idéal serait d’utiliser une optique à miroir, dite cata-dioptrique, car dépourvue d’aberration chromatique et neutre du point de vue transmission, mais outre que ces objectifs ne disposent pas d’un diaphragme mais d’une ouverture fixe, ce sont toujours des objectifs de longue focale et très encombrants ce qui poserait des problèmes au niveau du banc optique.
- La méthode sans objectif consiste à éclairer directement le capteur à l’aide d’une source tungstène ponctuelle : c’est la méthode dite du plan focal. La source est une source tungstène normalisée basse tension, régulée, de type sphère intégrante produisant un éclairage uniforme du capteur. La variation EV est obtenue en faisant varier la vitesse d’obturation de 1/3 en 1/3 d’EV (voir partie 4.A.1). Cette méthode est bien adaptée aux boîtiers photo sur lesquels l’obturateur peut varier de 1/3 en 1/3 d’EV selon les préconisations ISO, mais pas nécessairement aux caméras numériques qui ne possèdent pas toujours des variations d’obturation aussi subtiles, sauf à utiliser le clear scan, et se trouvent limitées par les vitesses lentes si on se cale sur 24 ou 25 i/s. Par ailleurs, les poses longues génèrent du bruit sur le capteur, la norme ISO recommandant de ne pas dépasser le 1/30^{ème}. La plage d’obturation du 1/8000^{ème} au 1/30^{ème} couvre 8 EV ce qui est inférieur à la dynamique des caméras actuelles. Il reste la possibilité de reculer la source mais aux courtes distances, les erreurs de mesure au luxmètre peuvent être importantes. En résumé, c’est une bonne méthode pour déterminer la sensibilité d’un capteur. En revanche, elle rend laborieuse la détermination de l’étendue utile, surtout si l’on veut couvrir 16 EV par 1/3 de valeur et si, de plus, l’on veut mesurer cette étendue utile pour toutes les plages de sensibilité proposées par la caméra.

2 DONNÉES DU PROBLÈME

A IMPORTANCE DE LA TAILLE DU CAPTEUR

La taille du capteur détermine la taille des photosites et cette dernière est déterminante dans de nombreux domaines tels que la sensibilité, la dynamique, la profondeur de champ, la diffraction et la FTM (Fonction de Transfert de Modulation) (tableau 1). La taille des photosites dépend également de la définition du capteur : en photo par exemple, la course aux pixels a rapidement atteint une limite car, avec une densité de photosites plus grande, donc des photosites plus petits, on réintroduit les défauts propres aux capteurs de petite taille.

Caméra	Dimensions capteur			
	H en mm	L en mm	Diag. en mm	Ratio brut
Super 16 mm	6.72	11.95	13.71	1.78
35 mm 2 perf	9.1	16.1	18.49	1.77
S35 mm 3 perf	13.9	24.9	28.52	1.79
Vidéo 1/3" 4:3	3.6	4.8	6.00	1.33
Vidéo 1/2" 4:3	4.8	6.4	8.00	1.33
Vidéo 2/3" 4:3 monture B4	6.6	8.8	11.00	1.33
Vidéo 2/3" 16:9 monture B4	5.39	9.58	10.99	1.78
Blackmagic Pocket	7.	12.5	14.33	1.79
Blackmagic 2.5K	8.8	15.8	18.09	1.80
Micro 4/3	13.5	18.	22.50	1.33
AJA CION	11.9	22.5	25.45	1.89
RED RAVEN	10.8	23.	25.41	2.13
Canon 7D M II	14.9	22.3	26.82	1.50
Sony F3, FS100U	13.3	23.6	27.09	1.77
Sony F5/F55, FS5, FS7, FS700U	12.7	24.	27.15	1.89
Sony F65	13.1	24.7	27.96	1.89
Arri ALEXA AMIRA 16:9	13.4	23.8	27.31	1.78
Panasonic Varicam 35 / LT	12.9	24.5	27.69	1.90
Sony NEX APS-C	15.6	23.5	28.21	1.51
Canon C100, C300, C500	13.8	24.6	28.21	1.78
RED Scarlet-W	13.5	25.6	28.94	1.90
Arri ALEXA mode 4:3	17.8	23.8	29.72	1.34
ANSI S35 Silent	18.66	24.89	31.11	1.33
RED Mysterium-X	14.6	27.7	31.31	1.90
Arri ALEXA Open gate Mode	18.13	28.17	33.50	1.55
RED Dragon 6K FF	15.8	30.7	34.53	1.94
Sony A7, Nikon D810, Canon 5D	24.	36.	43.27	1.50
RED Weapon 8K W	21.6	40.96	46.31	1.90
Arri ALEXA 65 (Full)	25.59	54.12	59.87	2.11
Arri ALEXA Spherical WS	22.64	54.12	58.66	2.39

▲ Tableau 1. Quelques dimensions de capteurs : film, vidéo et numérique illustrant la très grande variété présente sur le marché actuellement.

1 Rendement quantique

Le rendement du capteur dépend de plusieurs facteurs, mais, en premier lieu, de la surface de ses photosites. À l'instar des cristaux d'halogénure d'argent en argentique, plus la surface des photosites est grande plus le rendement du capteur sera important car des photosites de plus grande taille peuvent capter plus de photons. Pour un même ratio et une même résolution, donc avec le même nombre de photosites, un capteur 2 fois plus large et 2 fois plus haut aura des photosites d'une surface 4 fois plus grande, et aura ainsi un rendement 4 fois plus important (figure 4).

2 L'étendue utile

L'étendue utile pour un capteur est le nombre d'EV, ou de diaphragmes, que ce capteur peut restituer entre l'exposition maximale, correspondant au point de saturation, et l'exposition minimale, valeur la plus basse ayant un niveau de bruit acceptable (voir définitions en annexe).

Plus les photosites ont une grande surface, et donc plus le capteur est grand, plus ils peuvent accumuler de charges et donc capter des informations dans les hautes lumières. Comme ils sont par ailleurs plus sensibles, l'image résultante présentera également plus d'information dans les basses lumières. Son étendue utile globale sera donc plus grande.

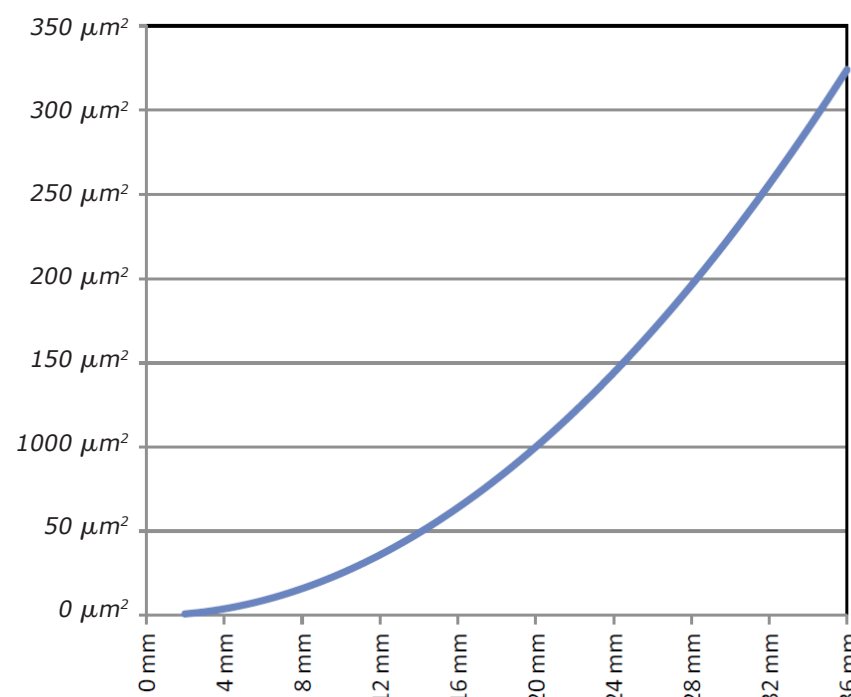


Figure 4
Surface théorique maximale des photosites en fonction de la largeur du capteur pour une définition HD : la courbe est exponentielle. (La taille réelle des photosites est bien entendu nettement inférieure à la taille théorique de la mosaïque.)

3 Profondeur de champ

La gestion de la profondeur de champ permet, dans un but esthétique, de séparer le sujet du fond. L'utilisation d'un grand capteur donnera un aspect "cinéma" à une vidéo, les capteurs de petite taille ne permettant pas de détacher le sujet du fond. On peut, tout au contraire, intégrer son sujet au décor. Les deux choix se respectent tant qu'ils sont le résultat d'une intention. Ce qu'il faut en conclure, c'est que pour un petit capteur la profondeur de champ devient très grande et donc un flou d'arrière plan sera très difficile à réaliser.

Si nous tenons compte que :

$$H = F^2 / (N \times \text{CoC})$$

H : hyperfocale en mètre, F : focale en mètre, N : ouverture géométrique

CoC : cercle de confusion en mètre

La progression de l'hyperfocale, fonction de F^2 , n'est donc pas linéaire mais exponentielle. L'apparence des courbes de profondeur de champ résultantes, liées à la largeur du capteur, sont donc sensiblement de type hyperboles.

Sur le graphique (figure 5), les courbes bleue et rouge affichent les limites de netteté avant et arrière. La figure résultante affiche la profondeur de champ en fonction de la largeur du capteur, à angle de prise de vues constant, profondeur de champ qui se situe donc entre la courbe verte, limite avant, et la courbe rouge, limite arrière. Cette profondeur de champ sera donc très grande avec un capteur de petite taille ce qui « collera » le sujet sur le fond de manière parfois peu esthétique et elle deviendra très faible avec un capteur de grande taille.

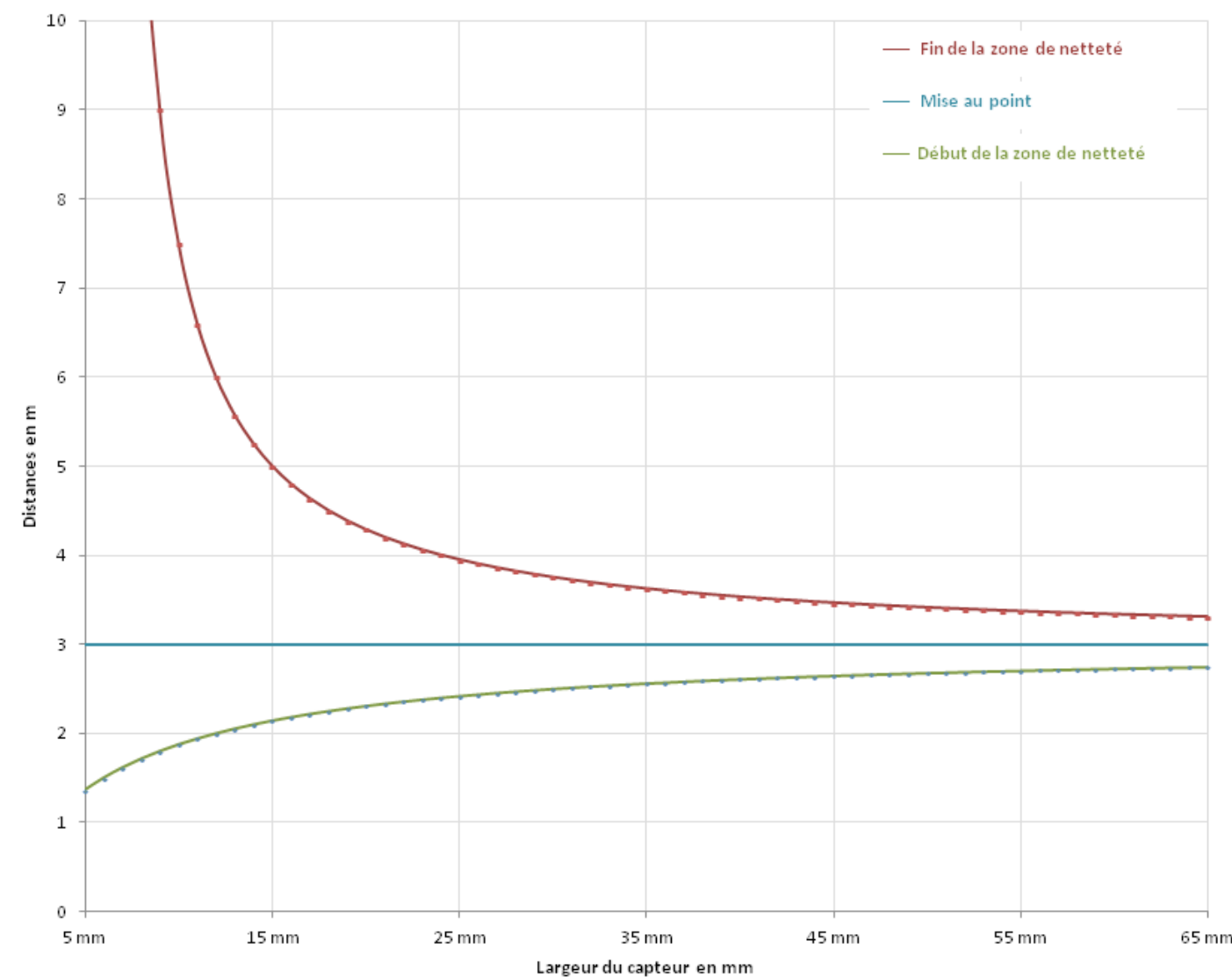


Figure 5
Profondeur de champ à une distance donnée en fonction de la largeur du capteur à focale équivalente pour conserver l'angle de champ.

Vous pouvez télécharger une feuille de tableur illustrant le phénomène [ici](#) (NB : les graphiques ne s'afficheront pas en ligne.)



4 Bruit

Un capteur de grande taille sera par ailleurs moins sensible au bruit : il dispose d'une meilleure dissipation thermique liée à sa surface, il est plus sensible donc demande un gain plus faible. La norme ISO 15739 définit avec précision la mesure du bruit.

5 Diffraction

La diffraction intervient lorsqu'on ferme le diaphragme au-delà d'une certaine ouverture. On quitte alors le domaine de l'optique géométrique pour entrer dans celui de l'optique ondulatoire : l'image, d'un point, une étoile par exemple, devient une tache, le cercle d'Airy (figure 6), qui sera d'autant plus grande que l'ouverture sera petite. La diffraction dégrade donc sérieusement la résolution des optiques au-delà d'une certaine ouverture.

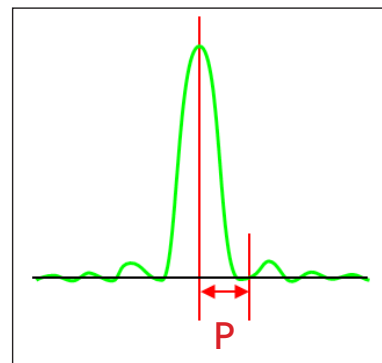
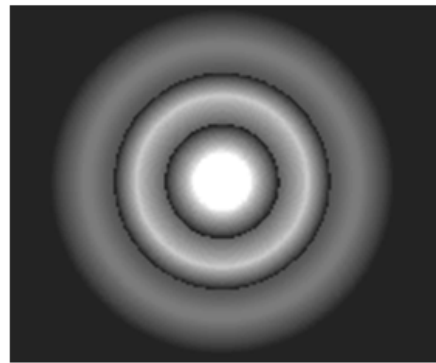
Le diamètre de cette tache dépend de l'ouverture selon la formule :

$$d = 2,44 \cdot \lambda \cdot N$$

d en nm si λ longueur d'onde en nm,

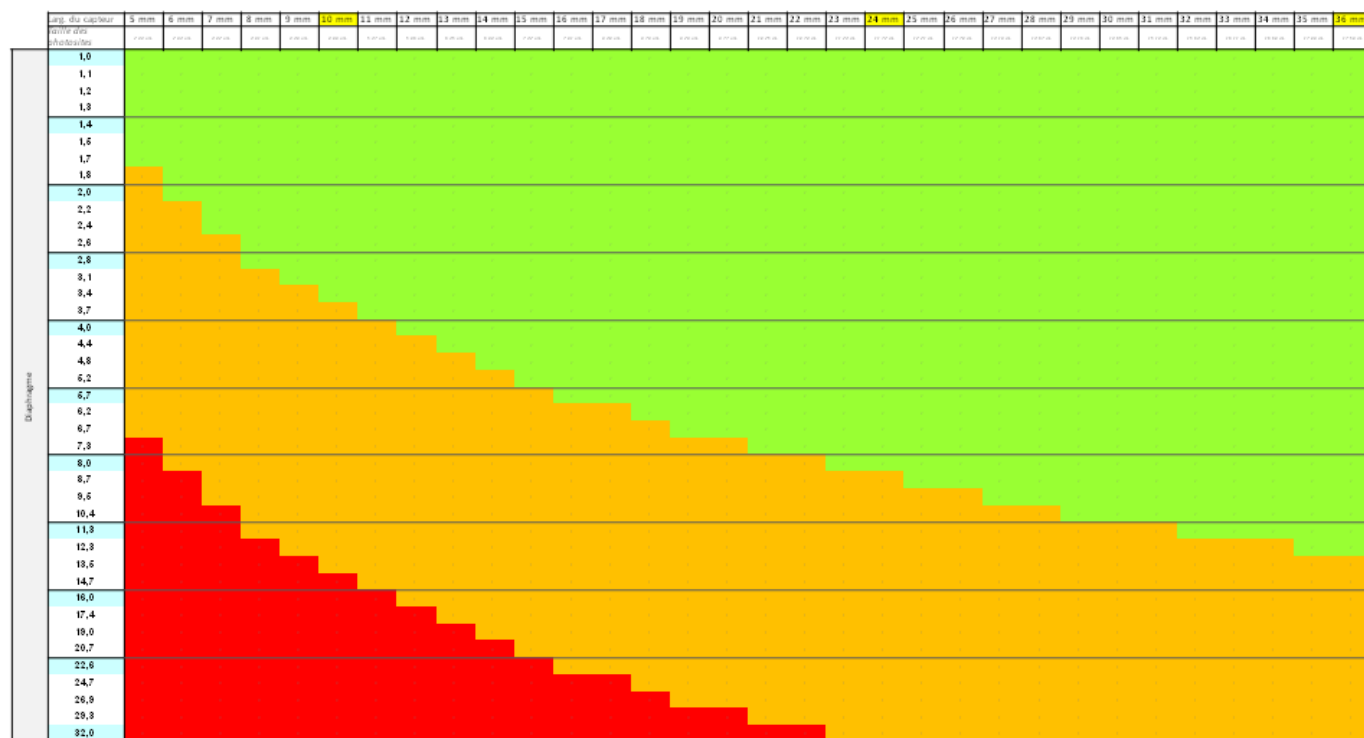
N ouverture géométrique.

► Figure 6
Cercle d'Airy.



On peut illustrer ce phénomène avec une feuille de tableur à télécharger [ici](#). Les couleurs, qui correspondent à une mise en forme conditionnelle, ne s'afficheront pas en ligne.

Cette feuille de tableur (figure 7) illustre la diffraction, en fonction de la largeur du capteur et de l'ouverture, pour une résolution horizontale de 2K, 4K, 6K ou 8K.

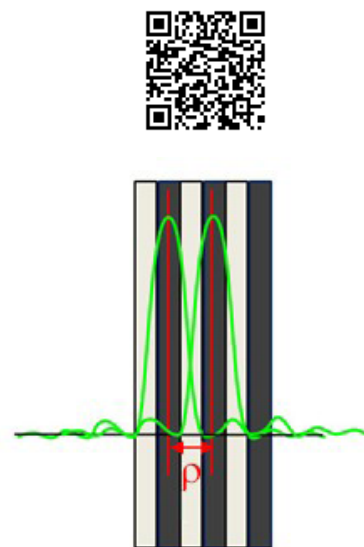


▲ Figure 7. Diffraction en fonction de la largeur du capteur.

Vous pouvez télécharger [ici](#) le fichier Excel.

Pour les calculs, $\lambda = 555 \text{ nm}$, ce qui correspond au pic de sensibilité spectrale de la vision humaine. Soit N l'ouverture géométrique (diaphragme). La diffraction commence lorsque le diamètre du cercle d'Airy dépasse la dimension d'un photosite (domaine orange).

Elle devient inacceptable lorsque le rayon du cercle d'Airy $\rho = 1,22 \cdot \lambda \cdot N$ (critère de Rayleigh) dépasse l'entraxe entre deux traits, sachant que pour faire un trait noir sur fond blanc, il faut deux colonnes de photosites (figure 8), une pour le noir et l'autre pour le blanc¹ : domaine rouge sur le graphique. Le critère de Rayleigh suppose par ailleurs que l'objectif ait une très bonne « fonction de transfert de modulation ».



▲ Figure 8
Représentation du critère de Rayleigh.

1. NB : Le fait de devoir utiliser deux colonnes pour dessiner un trait correspond par ailleurs au théorème de Nyquist-Shannon sur la quantification.

6 Fonction de transfert de modulation (FTM)

Il est beaucoup plus facile de construire des optiques pour un capteur de grande taille que pour un capteur de petite taille. En effet, si on divise par exemple la taille d'un capteur par 2, il faudrait pour conserver la même résolution que l'optique associée puisse passer des fréquences doubles. Le prix d'une telle optique serait donc multiplié par 2, 3 voire 4. Malheureusement, dans la réalité, c'est tout l'inverse qui se passe : pour obtenir des caméras ou des appareils photo bon marché les fabricants sont obligés de rogner sur tous les éléments possibles, taille du capteur, qualité optique, processeur d'image.

En dehors des qualités des objectifs, tout circuit électronique tend à atténuer les hautes fréquences, donc les fins détails de l'image. Les caractéristiques même de l'électronique associée aux photosites vont jouer sur la FTM.

Par ailleurs le gain de l'électronique associée aux photosites va varier selon la technologie et la taille des capteurs générant du bruit ce qui est préjudiciable à la FTM.

Enfin, pour les capteurs de petite taille, la diaphonie électrique² est un très gros problème en raison de la faible distance entre les photosites.

Une mesure de FTM est donc appropriée pour caractériser un capteur et l'électronique qui l'entoure. La norme ISO 12233 définit précisément la mesure de la réponse en fréquence spatiale (Spatial Frequency Response ou SFR).

B TECHNOLOGIES DES CAPTEURS

1 CCD et CMOS

Apparus en 1970 dans les Laboratoires Bell et donc historiquement les plus anciens, les capteurs CCD laissent peu à peu place aux capteurs CMOS. Ce sont deux technologies très différentes présentant chacune divers avantages et inconvénients. Moins sensibles au demeurant les capteurs CMOS ont fait d'énormes progrès et, devant la course aux pixels et à l'ultra-haute définition, ils tendent à s'imposer à cause de leur faible consommation, de leur rapidité de traitement : pas de zones mémoires complexes comme sur les capteurs CCD. Si les capteurs CCD, de type HAD ou FIT, équipent encore nombre de caméras HD broadcast, les capteurs CMOS sont bien adaptés aux hautes fréquences de l'ultra haute définition. Par ailleurs de gros progrès ont été faits sur les capteurs CMOS pour éviter en particulier les artefacts de rolling shutter qui provoquent la déformation des objets dans les panoramiques ou les objets en mouvement et surtout pour améliorer leur sensibilité (Sony Clearvid™ et Exmor™). De plus, leurs sous-couches électroniques peuvent déjà inclure des étapes décisives du traitement comme le gain et même la conversion analogique/numérique ce qui limite le bruit extra-capteur.

CCD	CMOS
Charge Coupled Device	Complementary metal oxide semi-conductor
Coût de fabrication important	Coût de fabrication faible si série importante
Lenteur	Rapidité de traitement
Consommation élevée	Consommation très faible (cent fois moins que les CCD)
Bonne uniformité	Moins bonne uniformité (corrigée par une mémoire de matrice)
Rendement quantique élevé (jusqu'à 80 %)	Rendement quantique plus faible (25%)
Étendue utile (dynamique range) élevée	Étendue utile plus faible
Bonne sensibilité	Sensibilité plus faible (bruit plus élevé)
Blooming ou Smear (trait blanc vertical sur les hautes lumières)	Rolling shutter
Obturbateur global : scintillement global	Obturbateur par ligne : scintillement par bande

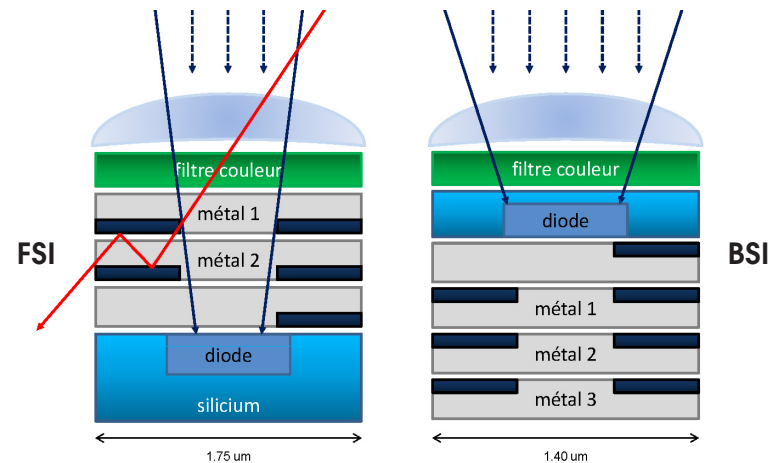
2. La diaphonie optique et la diaphonie électrique, optical crosstalk ou electrical crosstalk, constituent un parasitage optique ou électrique entre deux zones très proches d'un composant. C'est une des défis majeurs pour la conception d'un capteur.

2 FSI et BSI

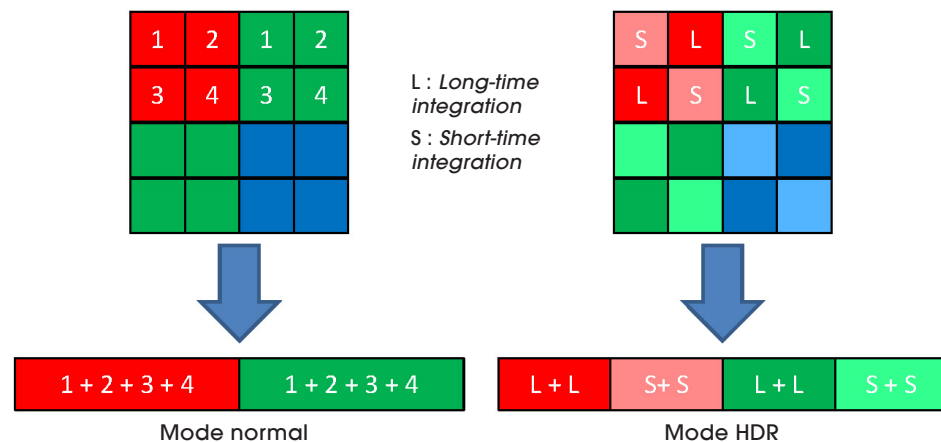
L'architecture traditionnelle FSI (Front Side Illumination = Illumination par l'avant) laisse peu à peu la place à une architecture BSI (Back Side Illumination = Illumination par l'arrière) (figure 9), comme la technologie Sony Exmor™, qui améliore considérablement l'efficacité quantique et la sensibilité, et diminue la diaphonie optique² en réduisant la lumière parasite réfléchi sur les couches métalliques du capteur. Cette architecture permet également de créer des composants plus minces, d'utiliser des objectifs à plus grande ouverture et présentant un angle de champ plus large (CRA = Chief Ray Angle).

Par ailleurs, d'autres technologies développées par Sony et réservées pour le moment à des applications industrielles, Starvius™ (figure 10) et Pregius™, constituent des améliorations notables des capteurs CMOS. La technologie Pregius, dite "global shutter pixel technology", apporte un obturateur global d'une façon similaire à une structure CCD, annulant ainsi l'effet de rolling shutter, mais pour une définition pour le moment inférieure au 4K. Autre intérêt, la 3^{ème} génération de cette technologie décompose l'image en 64 zones pouvant disposer chacune d'un temps d'exposition différent.

La technologie Starvius décompose, elle, chaque élément d'image en 4 sous-photosites, à 2 temps d'intégration différents, l'un rapide et l'autre long, selon une matrice Quad Bayer, ce qui permet d'enregistrer des images HDR en vidéo 4K. Ce sont des axes de progrès qui apparaîtront tôt ou tard sur les caméras grand public et sur les caméras de cinéma numérique.



▲ Figure 9
Architecture FSI et BSI.



► Figure 10.
Technologie
STARVIUS™

C SÉPARATION DES PRIMAIRES

1 Séparation à prismes (tri CCD ou tri CMOS)

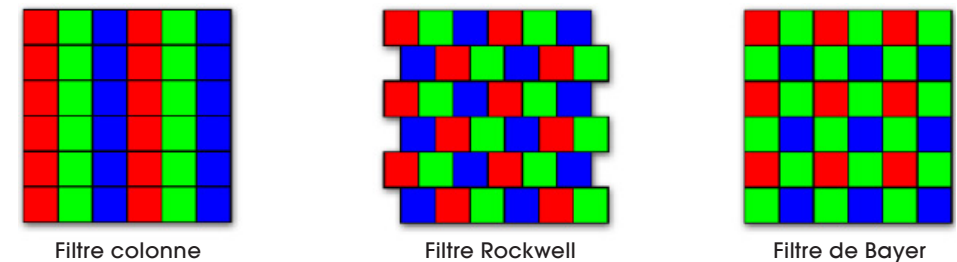
La séparation des primaires par des prismes associés à des filtres est la plus ancienne : c'était la seule technologie utilisable avec des tubes pour obtenir une image couleur. Ces derniers ont ensuite été remplacés par des CCD. L'avènement des caméras tri-CCD a marqué toute une époque et continue d'opérer sur nombre de caméras broadcast HD et même UHDTV, cette technologie présentant une grande rapidité de traitement (pas de dématricage) et une excellente séparation des primaires. Les prismes présentent cependant de nombreux inconvénients physiques et optiques :

- Encombrement
- Vignettage
- Aberrations chromatiques
- Nécessité de formules optiques rétrofocus pour les courtes focales
- Incompatibilité avec les optiques de cinéma traditionnelles

2 Séparation par matrice de filtres colorés (mono capteur)

L'avènement de la photographie numérique et la rencontre de la photo et de la vidéo ont contribué à s'affranchir des prismes séparateurs et à imposer, pour le cinéma numérique, des caméras mono-capteur.

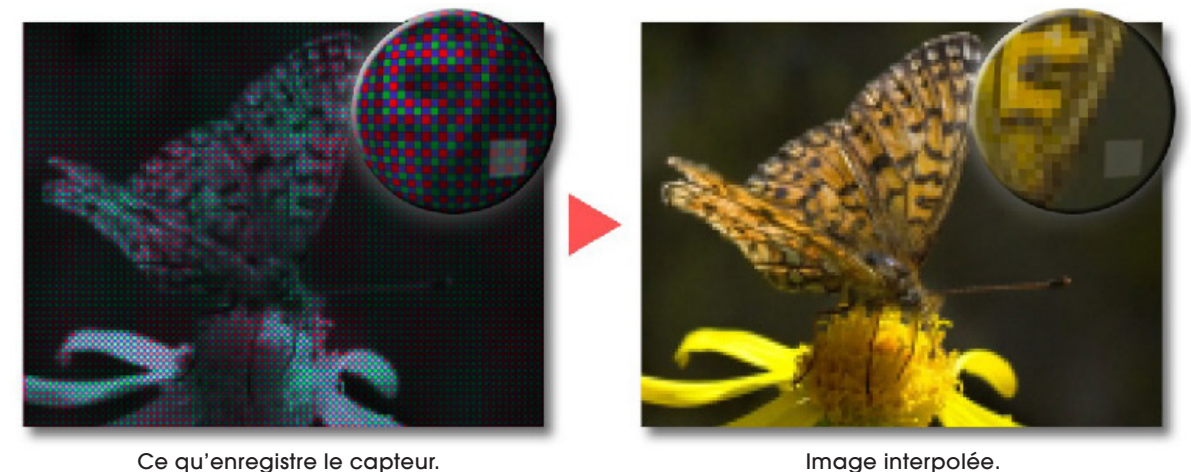
Sur les caméras mono capteur la séparation des primaires est obtenue par une matrice de filtres colorés placée devant les photosites. Divers systèmes de matrices colorées existent (figure 11), avec parfois plus de 3 primaires, la plus utilisée étant celle de Bayer. Ces systèmes ne permettent pas d'obtenir directement une image RGB : il faut dématricer le signal issu des photosites.



► Figure 11
Quelques
exemples de
matrices.

3 Importance du dématricage

Les technologies à mono capteur imposent, lors du développement numérique, un dématricage, aussi connu sous le néologisme de débayerisation. Cette étape constitue une interpolation des valeurs issues des photosites permettant de les convertir en pixels vrais (voir annexe D. Pixel) et d'obtenir ainsi les valeurs numériques R, G, B caractérisant chaque pixel. Le résultat global dépend beaucoup des algorithmes utilisés lors de cette phase clef. C'est pour cette raison que, dans la mesure du possible, il est important pour cette étude de pouvoir accéder directement aux valeurs numériques du fichier RAW pour s'affranchir de tout type d'interpolation (figure 12).



▲ Figure 12
Interpolation d'un fichier RAW.

L'étape de dématricage est une étape cruciale qui peut être faite dans la caméra ou, en mode RAW, a posteriori, avec des moyens beaucoup plus puissants et des algorithmes plus performants.

L'interpolation la plus simple est une interpolation bilinéaire mais elle ne tient pas compte de la forme des objets et peut provoquer des artefacts couleur en particulier des moirages. Des interpolations plus évoluées existent comme l'interpolation par constante de teinte, pondérée adaptative, par filtrage dans l'espace de Fourier, ou encore l'interpolation GEDI (Green Edge Directed Interpolation), cette dernière étant considérée par les experts comme l'une des meilleures, mais ce traitement peut demander des dizaines d'opérations pour créer chaque pixel ce qui reste un problème pour opérer dans la caméra, en temps réel, sur une image animée.

Lien Wikipedia sur
le dématricage [ici](#).



Thèse d'Harold Felliépeau
sur le dématricage [ici](#).



3 MIRES DE CONTRASTE, TYPES DE FICHIER ET OUTILS D'ANALYSE

A LES MIRES DE CONTRASTE

Les mires présentant une étendue utile suffisante ne peuvent être que du type rétro-éclairées.

1 Les mires Xyla

Les mires [Xyla](#), d'un prix relativement élevé, couvrent jusqu'à 26 EV/IL et ont une forme particulière en xylophone pour minimiser le flare dans les hautes lumières. Elles incorporent une source et un système d'obturateur-masque permettant d'isoler une plage précise.



2 Arri Dynamic Range Test Chart DRTC-1

Cette mire est constituée de filtres rotatifs et permet de couvrir 15,5 EV/IL. La boîte à lumière n'est pas fournie. Le logiciel d'analyse ARRI Aquamat Universal DRTC est fourni et tourne sous Windows.

3 TE264

Cette mire par transparence de 20 zones suivant la norme ISO 14524/15739 présente un contraste de 1 : 1 000 000 soit un écart d'environ 20 EV. Elle est commercialisée par Image Engineering à moins de 900 €. [Ce site commercialise également de nombreuses autres mires.](#)



4 La mire réalisée par Alain Sarlat à l'École Nationale Louis Lumière

Cette mire est constituée de deux coins issus d'un sensitographe "type 6". La première comporte 21 plages par pas de 2/3 Ø et la seconde 21 plages par pas de 1/3 Ø qui ne couvre que les 7 premiers EV de la gamme supérieure. Ces plages, composées de dépôts de carbone, sont parfaitement neutres ; leur étal et leur colorimétrie ont été contrôlées par un spectroradiomètre Minolta CS-2000. Les 3 plages les plus claires sont pourvues sur la moitié d'un filtre neutre 0.10 dans le but de cerner de façon plus précise le point de saturation. Cette mire offre au total un écart de 14 EV.

Elle est positionnée devant une [sphère intégrante](#) d'Ulbricht-Blondel ESSERT offrant un étal suffisant pour la plage testée et une température de couleur de 3200K.

Au centre de la mire, un cercle vide muni d'un bouchon d'obturation permet de mesurer au préalable la luminance de la source et de régler ainsi diaphragme et obturateur de la caméra.



B LES DIFFÉRENTS TYPES DE FICHIER RAW

L'intérêt du mode RAW est de chercher à préserver le maximum d'information et de dynamique. C'est à tort que le RAW est souvent appelé Négatif Numérique puisque, comme énoncé précédemment, une partie du développement est effectué dans la caméra et que, par ailleurs, sa progression est positive.

L'inconvénient d'un fichier RAW est, certes, d'être plus volumineux mais il faut rappeler qu'un fichier RAW non dématricé ne contient que le tiers des informations que contiendrait un fichier RGB extrapolé ou même un fichier composantes vidéo Y'CbCr non compressé avec la même profondeur de quantification. Tous les photographes savent qu'avec la même profondeur de quantification et la même résolution, un fichier RAW est toujours moins volumineux qu'un fichier Photoshop dématricé et cela dans un rapport de 1 à 3 (sans tenir compte des calques éventuels).

Chaque fabricant a développé son propre type d'encodage RAW. En cas d'impossibilité de lecture directe des valeurs inscrites dans le fichier RAW (du fait de l'absence de communication de la part des fabricants), Adobe DNG Converter sera utilisé pour transformer le RAW en DNG mais sans certitude d'une transparence absolue dans la conversion.

Il est indispensable de connaître les différents types de solutions dites RAW, les courbes de transfert et les profondeurs de quantification pour comprendre les limites, les avantages et les inconvénients de tel ou tel système.

1 Les fichiers DNG

Le type de fichier DNG, Digital Negative, a été développé par Adobe à partir de la structure des fichiers TIFF, Tagged Image File Format, dans le but de créer un équivalent des fichiers RAW à la fois pour la prise de vue et pour l'archivage. C'est un format ouvert encodé de 8 à 32 bits pouvant contenir une image RAW matricée ou une image déjà développée, c'est-à-dire dématricée.

Un fichier DNG peut, en théorie, être codé en log ou en linéaire sur 8, 16 ou 32 bits avec ou sans compression et intégrer de nombreuses métadonnées comme un profil (LUT), voire une géolocalisation.

Un certain nombre de caméras (Varicam LT, BlackMagic) ou encore d'enregistreur externes (Atomos Shogun ou un Odyssey 7 Q+) permettent d'utiliser ce mode d'enregistrement. On peut regretter qu'un plus grand nombre de constructeurs n'offre pas cette option. Cependant, les vidéos DNG se présentent sous forme d'un dossier contenant des milliers d'images DNG ce qui n'est pas forcément commode à manipuler : on a plus l'habitude, en vidéo, de considérer un plan comme un seul fichier encapsulant toutes les images, un code temporel et même le son.



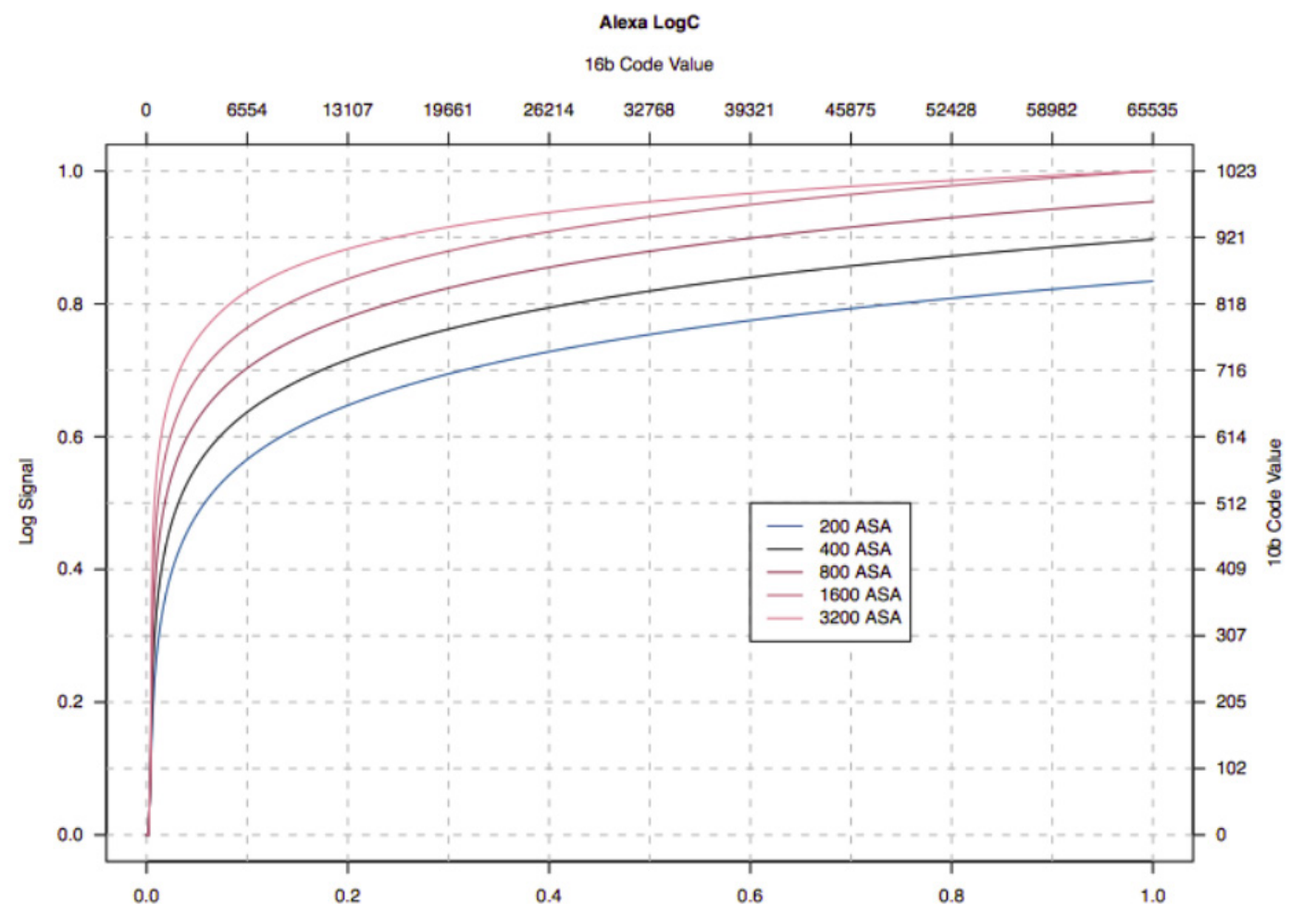
[Une description très complète peut se trouver ici.](#)

2 Les fichiers Arri RAW

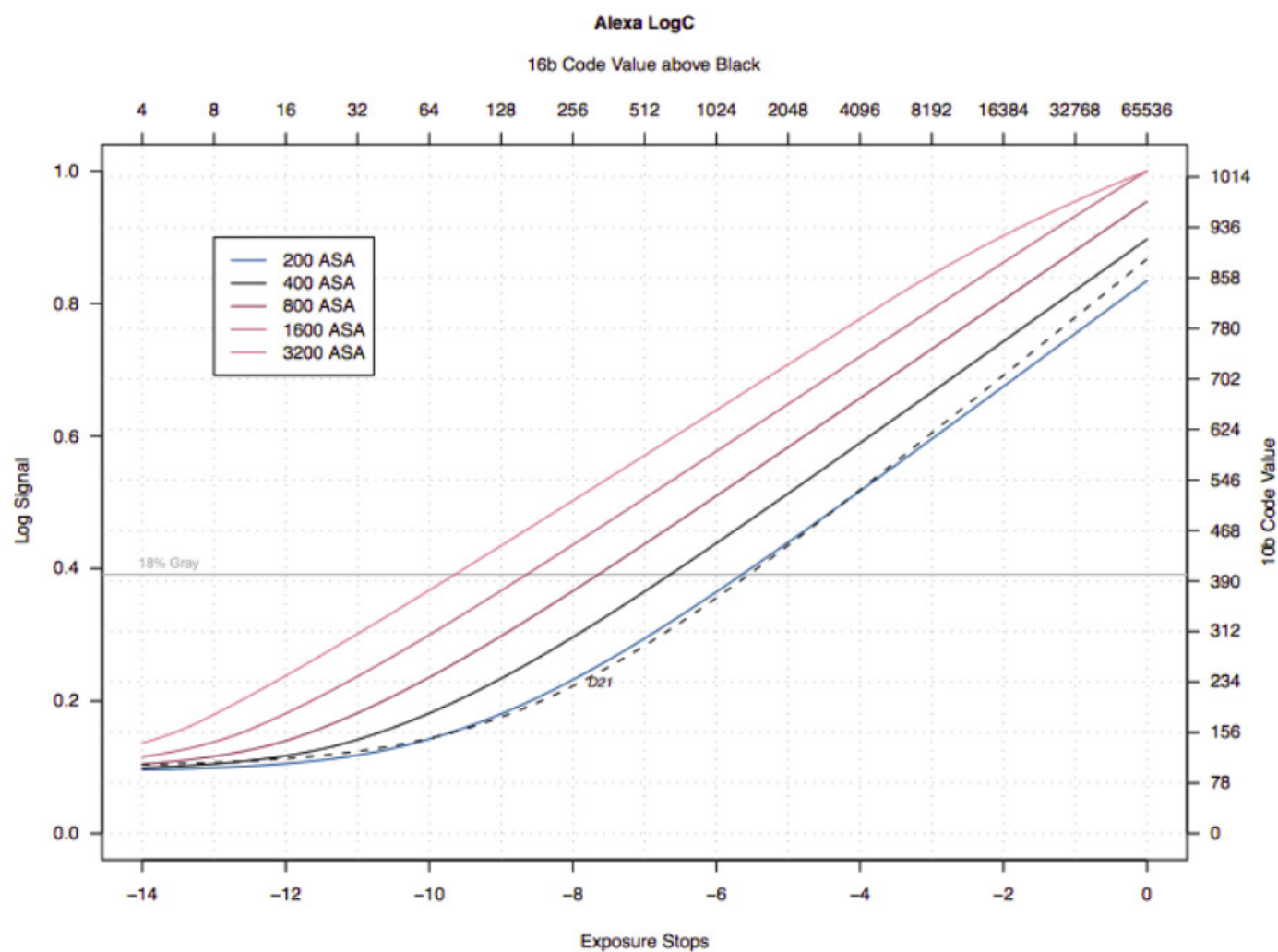
Le système ARRI RAW se base sur un log C dont la formule, et donc la courbe, change selon la sensibilité affichée sur la caméra (figure 13). Le traitement se fait en 16 bits linéaires dans la caméra puis est converti en log C sur 10 bits ou 12 bits avant écriture dans le fichier.

C'est donc un fichier RAW en 10 bits ou 12 bits log qui est enregistré. La courbe log dépend de la sensibilité affichée sur la caméra ; la sensibilité n'est donc pas une métadonnée.

L'intérêt de ce système est de pouvoir quantifier différemment les basses lumières ou les hautes lumières selon le réglage de la sensibilité sur la caméra. Une sensibilité faible privilégiera le rendu des hautes lumières et à l'inverse une sensibilité haute celui des basses lumières (figure 14).



▲ Figure 13. Fonctions de conversion linéaire/log selon le réglage de la sensibilité



▲ Figure 14. Courbe de rendu résultante EV/log selon la sensibilité

3 Les fichiers RAW Panasonic

La Varicam Pure est une version de la Varicam 35 équipée d'un module partenaire, Codex, permettant d'enregistrer en RAW 4096x2160 non compressé 12 bits en V-Log jusqu'à 120 i/s (10 bits au-delà) et s'appuyant sur le standard DNG. À noter que la balance des blancs est faite préalablement et n'est donc pas une métadonnée. Cette gamme de caméras présente également la particularité de posséder deux sensibilités ISO nominales, 800 ISO et 5000 ISO. La Varicam LT peut également, via une double liaison SDI 3G, enregistrer en RAW sur un Atomos Shogun ou un Odyssey 7 Q+ en DNG. Le V-RAW a les mêmes caractéristiques que sur la Varicam Pure : 4K 12 bits non compressé, mais jusqu'à 60 i/s maximum.

4 Les fichiers RAW SONY

Sony propose, via les interfaces idoines, des fichiers RAW X-OCN (*X-Original Camera Negative*) 16 bits en mode linéaire. X-OCN ST est la version standard ; X-OCN LT est la version allégée, compressée sans pertes visibles. Sur la Venice, Sony propose également deux modes de sensibilité (500 ISO et 2500 ISO). Sur la F65, la température de couleur n'est pas une métadonnée.

Plus d'informations [ici](#)

5 Les fichiers RAW RED

RED a fait du mystère un outil marketing. RED propose un fichier RED RAW compressé R3D. L'espace couleur proposé est un espace REDWideGamutRGB (RWG) basé sur un blanc D65 et un log sur 10 bits Log3G10 pour lequel le gris à 18 % se retrouve à 30 % de la valeur numérique de sortie.

Un SDK (*Software Development Kit*) est disponible en téléchargement.



[Workflow](#)



[White paper](#)



[SDK](#)

C LES OUTILS LOGICIELS D'ANALYSE UTILISABLES

Ces outils permettent de lire directement les valeurs à l'intérieur de beaucoup de fichiers RAW donc sans altération due à une interprétation, ou dématrîçage, souvent appelée développement.

1 Matlab

[Matlab](#) est un environnement de développement par scripts orienté mathématiques, mais aussi traitement de l'image et traitement du signal.



2 GNU Octave

Disponible pour Linux, Max OS ou Windows, [GNU Octave](#) est une alternative libre et gratuite à Matlab.

Octave est compatible avec de nombreux scripts Matlab ce qui évite d'avoir à réécrire les scripts dans un nouveau langage.



3 RAW Digger

[Raw Digger](#) est un outil d'analyse des fichiers RAW. Ce n'est pas un outil de « développement » RAW. La version complète permet de créer des grilles d'analyse de l'image et d'exporter les valeurs issues du fichier RAW dans un fichier de type tableau de données CSV. Cette version permet également de créer des profils (LUT).



4 MÉTHODOLOGIE

A MÉTHODES DE LA NORME ISO 12232

Quelles sont les causes de dégradation de l’image de part et d’autre de l’exposition optimale ?

- La sous-exposition (signal trop faible) donne une image avec du bruit, en particulier dans les basses lumières. Dans ce cas, l’exposition minimale dépend du niveau de bruit que l’on peut tolérer, notion subjective ;
- La sur-exposition (signal saturé) conduit à un écrêtage de toutes les hautes lumières au delà du point de saturation, valeur déterminable de manière objective.

Publiée pour la première fois en 1998 et réactualisée depuis, la norme ISO 12232:2006(E), destinée aux appareils photo numériques (Digital Still Cameras) définit l’indice d’exposition recommandé et la sensibilité ISO.

La norme propose deux méthodes de calcul, qui donnent des valeurs de sensibilité différentes :

- une méthode basée sur la saturation du signal donc calée sur les hautes lumières ;
- une méthode basée sur le bruit donc calée sur les basses lumières.

Ces deux méthodes aboutissent à des indices d’exposition différents pour une même OETF³.

Pour chacune de ces méthodes, la norme considère deux approches :

- sans objectif — mesure photométrique dans le plan focal ;
- avec objectif — mesure photométrique sur charte de gris.

L’intérêt de chaque mode de calcul ISO dépend du type d’application :

- Lorsque les conditions d’éclairage sont contrôlées, comme lors d’une prise de vues en studio, les indices d’exposition sont sélectionnés pour donner la meilleure image possible, avec les hautes lumières de l’image tombant juste en dessous du point de saturation. Ce type de situation d’exposition est décrit par l’indice ISO basé sur la saturation ;
- Lorsque les conditions d’éclairage sont inférieures aux conditions idéales, un indice ISO basé sur le bruit est plus utile. Dans ce calcul, le rapport signal sur bruit (SNR : Signal to Noise Ratio) est utilisé pour calculer l’indice ISO. Cet indice ISO (S) correspond au réglage maximal de l’indice d’exposition pour atteindre le rapport SNR =10 (première image acceptable) et SNR = 40 (première image excellente).

■ 1 Méthode du plan focal

Le capteur est éclairé sans objectif par une source tungstène basse tension, régulée, de façon que la distance entre le capteur et la source soit telle que les plus larges dimensions de la source ou du capteur ne soient pas plus grandes que 1/20^{ème} de la distance source capteur pour qu’ainsi l’éclairement soit uniforme. L’éclairement est pris au luxmètre au niveau du plan focal donc en reculant l’appareil pour la mesure. Le temps de pose ne doit pas excéder 1/30^{ème} de seconde.

La sensibilité basée sur le rapport signal sur bruit (SNR) est déterminée par :

$$S_{noise10} = 10 / H_{S/N10} \text{ pour SNR = 10 (Première image acceptable)}$$
$$S_{noise40} = 10 / H_{S/N40} \text{ pour SNR = 40 (Première image excellente)}$$

H est la lamination en lux.secondes, avec H = E.t pour chacune des deux conditions (E est l’éclairement en lux, t est le temps d’exposition en secondes).

La sensibilité basée sur le point de saturation est déterminée par :

$$S_{sat} = 78 / H_{SAT}$$

H_{SAT} est la lamination qui produit le signal valide maximal (non écrêté et sans artefact d’éblouissement de type bloom ou smear), appelée aussi point de saturation.

3. OETF : Opto-Electronic Transfer Function, c’est la courbe de transfert lamination/valeurs numériques encodées. En numérique ce terme est impropre car nous ne mesurons pas des tensions en sortie de capteur, mais des valeurs numériques après conversion analogique/numérique avec parfois des modifications effectuées dans la caméra avant même cette étape. Cependant OETF est le terme utilisé internationalement par les différents instituts de normalisation. Nous l’utiliserons donc dans cette étude.

■ 2 Méthode basée sur la moyenne arithmétique de la luminance de la scène

Cette méthode utilise un objectif, et est donc particulièrement adaptée aux appareils photo compacts.

Elle consiste, dans un premier temps, à calculer la luminance moyenne de la scène en cd/m². Le plus simple est de filmer une charte de gris neutre à 18 % uniformément éclairée remplissant totalement l’image, le point étant fait sur l’infini pour ne pas introduire de coefficient de tirage.

La sensibilité basée sur le rapport signal sur bruit est déterminée de la manière suivante : Pour mesurer la luminance de la scène, l’éclairage est gradué jusqu’à ce que l’image de la charte à 18 % produise une valeur de sortie moyenne égale à 18/106 de l’échelle entière. Pendant ce réglage, le temps d’exposition est maintenu constant. L’échelle entière est atteinte, soit dès que l’imageur sature, soit dès que le convertisseur AN (analogique-numérique) de la caméra atteint sa valeur maximale. La sensibilité ISO est alors donnée par la formule :

$$S_{bruit_x} = \frac{15.4 \times N^2}{L_{S/N_x} \times t}$$

N	ouverture photométrique de l’objectif utilisé pour la mesure
L _{S/N x}	luminance en cd/m² de la charte de gris à 18 % engendrant les rapports SNR = 10 ou SNR = 40
t	temps d’exposition en secondes

15.4 constante déterminée pour un objectif à 90 % de transmission, un facteur de vignettage de 0.98 et moins de 10° d’écart par rapport à l’axe de la scène. Elle peut être calculée en tenant compte de la formule de transfert :

$$H = \frac{0.64 * L * t}{N^2}$$

La sensibilité basée sur le point de saturation est déterminée de la manière suivante :

$$S_{sat} = \frac{78}{H_{sat}}$$

Ou encore, en appliquant la formule de transfert :

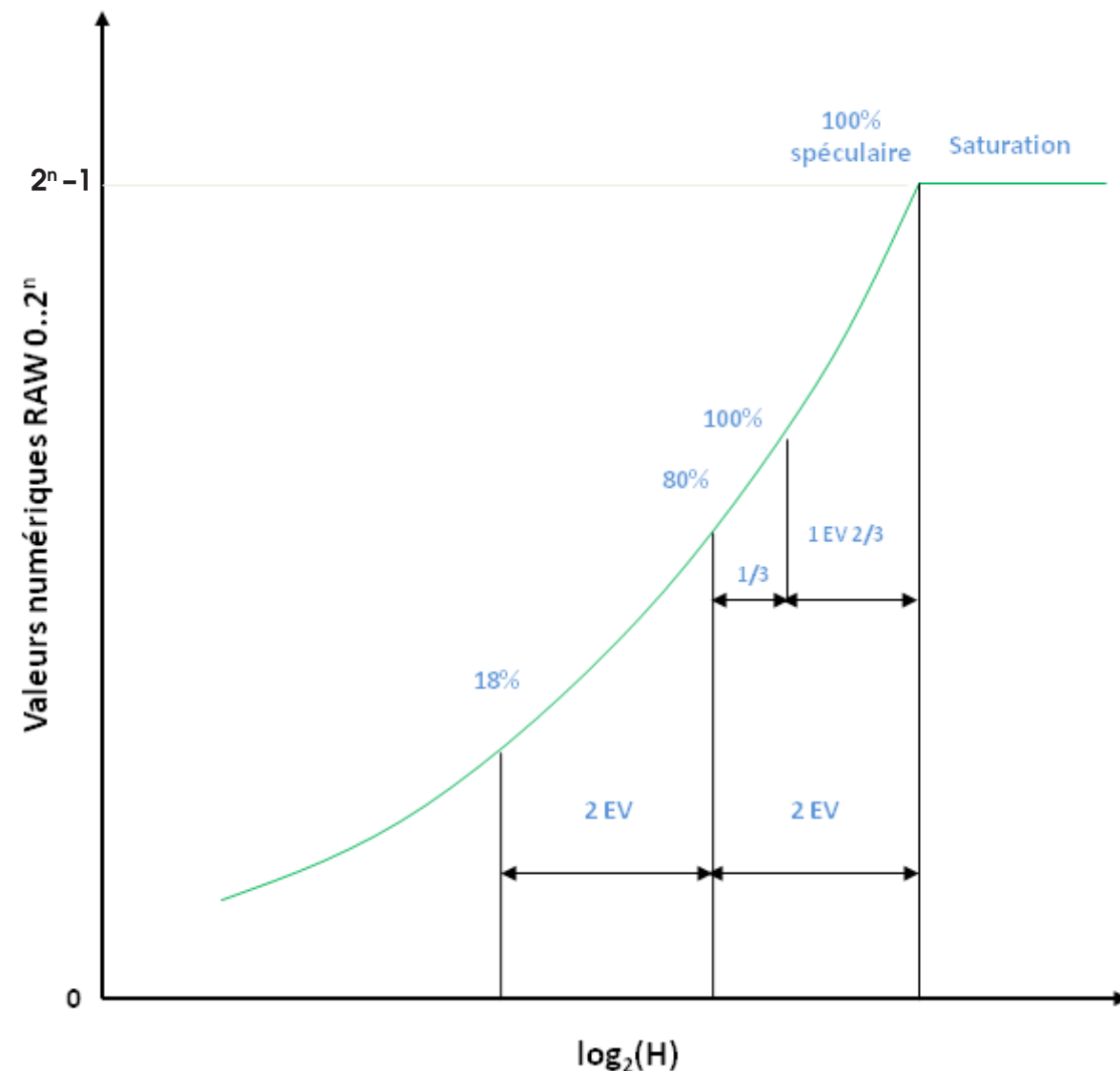
$$S_{sat} = \frac{120 \times N^2}{L_{sat} \times t}$$

L _{sat}	luminance en cd/m² de la charte de gris à 18 % au point de saturation
------------------	---

B MÉTHODE DÉVELOPPÉE PAR ALAIN SARLAT

Alain Sarlat, enseignant à l’École Louis Lumière, a développé une méthode originale. La solution retenue est une solution avec objectif. Elle consiste à filmer une mire composée de deux gammes de gris rétro-éclairées à l’aide d’une seule et même optique dite de référence (voir partie 2.B.3). L’optique retenue est un 50 mm Zeiss Planar en monture PL qui sera adapté sur toutes les caméras. Cette optique sera aussi utilisée pour les mesures de réponses spectrales. Elle est caractérisée en terme de transmission spectrale, les courbes OETF obtenues sont pondérées par ce facteur (voir partie 4.F).

L’idée centrale de cette méthode repose sur le principe d’exposition pour les hautes lumières, comme en positif. On lit les valeurs numériques RGB du fichier RAW et on trace la courbe OETF (lumination/valeurs numériques). Les valeurs de chaque plage de la mire sont lues directement dans le fichier RAW via un script MATLAB sur une moyenne de 30 images pour minimiser l’incidence du bruit inter-image.



▲ Figure 15. Courbe OETF d'une caméra numérique.

Cela permet de tracer la courbe OETF (figure 15) avec :

- En abscisse le log binaire des luminations ($\log_2(H)$) pour revenir à une échelle pseudo-psychométrique ou un écart d'une unité représente 1 EV.
- En ordonnée le log binaire des valeurs numériques relatives : $\log_2(Vnr)$

1 Estimation de la sensibilité

Alors qu'en argentique les calculs de la sensibilité et de l'étendue utile se calent sur le pied de courbe et les basses lumières, ce calage se fera ici sur les hautes lumières à partir du point de saturation à l'instar d'un film inversible, ce point étant la limite absolue de la lumination au-delà de laquelle le capteur ne module plus.

On considère la lumination H exprimée en lux.secondes comme réciproque, donc :

- $H = E \times t$
- H : lumination en lux.secondes
- E : éclairage du capteur en lux
- t : temps d'exposition en secondes

En négligeant le flare, la formule de transfert photométrique nous donne la lumination reçue par le capteur pour le point de saturation H_s :

$$H_s = \frac{0,64 * L_s * t}{N^2}$$

4. La simplification de l'équation de transfert photométrique aux conditions générales de prise de vue aboutit à un coefficient de 0,65. Alain Sarlat propose d'approximer à une puissance de 2 pour simplifier les calculs.

- L_s : luminance de la plage de saturation sur la mire en cd/m^2
- N : ouverture photométrique
- t : temps d'exposition en secondes

Nous en déduisons :

$$\frac{N^2}{t} = \frac{0,64 * L_s}{H_s}$$

Par ailleurs, comme $EV = 2 \log_2(N) - \log_2(t)$ et $EV = \log_2(L_m) + \log_2(S) - \log_2(k)$ nous obtenons :

$$\frac{N^2}{t} = \frac{L_m * S}{k}$$

- L_m : luminance de la plage de gris moyen (18 %) diffus.
- S : indice d'exposition
- k : facteur dépendant de l'étalonnage du posemètre

D'où nous obtenons :

$$\frac{0,64 * L_s}{H_s} = \frac{L_m * S}{k}$$

$$H_s = \left(\frac{0,64 * k}{S} \right) * \left(\frac{L_s}{L_m} \right)$$

Avec un facteur k de 12.5, nous trouvons

$$H_s = \left(\frac{8}{S} \right) * \left(\frac{L_s}{L_m} \right)$$

L_s / L_m exprime le rapport de contraste linéaire entre le point de saturation et le point 18 % diffus.

Si nous considérons que nous avons 2 EV d'écart entre le point 18 % et le point 80 %, 1/3 d'EV entre le point 80 % et le point 100 % diffus, et qu'un 100 % spéculaire serait 11 (Pi) fois plus grand⁵, ce qui correspond à 1 EV + 2/3, nous avons au total un écart de 4 EV entre le 18 % diffus et le 100 % spéculaire, soit 2...4...8...16, donc un écart de 16 en linéaire.

$$H_s = \left(\frac{8}{S} \right) * 16$$

Nous obtenons :

$$S = \frac{128}{H_s}$$

Cette méthode ne prétend pas proposer une norme. C'est plus une stratégie d'exposition : en fonction de l'indice d'exposition choisi, on se placera dans une partie ou l'autre de la courbe.

2 Estimation de l'étendue utile

L'étendue utile (en anglais dynamic range) est la plage de modulation entre le niveau de bruit acceptable et le seuil de « saturation » du capteur. C'est le nombre d'EV/IL (Exposure Value ou Indice de Lumination) que la caméra est capable de traduire. La latitude d'exposition, à ne pas confondre, est, elle, le droit à l'erreur.

Par rapport à notre échelle EV/IL qui est un log en base 2, ou log binaire, la décharge du capteur dans la caméra est linéaire quoiqu'une recherche et des applications industrielles existent pour des capteurs log. Cela veut donc dire que la première plage EV/IL, celle correspondant à la zone la plus claire enregistrable sous le point de saturation, occupera la moitié de l'espace de quantification, la seconde plage la moitié restante donc le quart de l'espace de quantification, la plage suivante le 1/8 de l'espace de quantification etc.

Ceci explique pourquoi il est nécessaire de poser au plus juste en numérique et qu'une sous-exposition systématique provoquera du bruit, pourquoi également les caméras doivent travailler en interne sur un nombre de bits

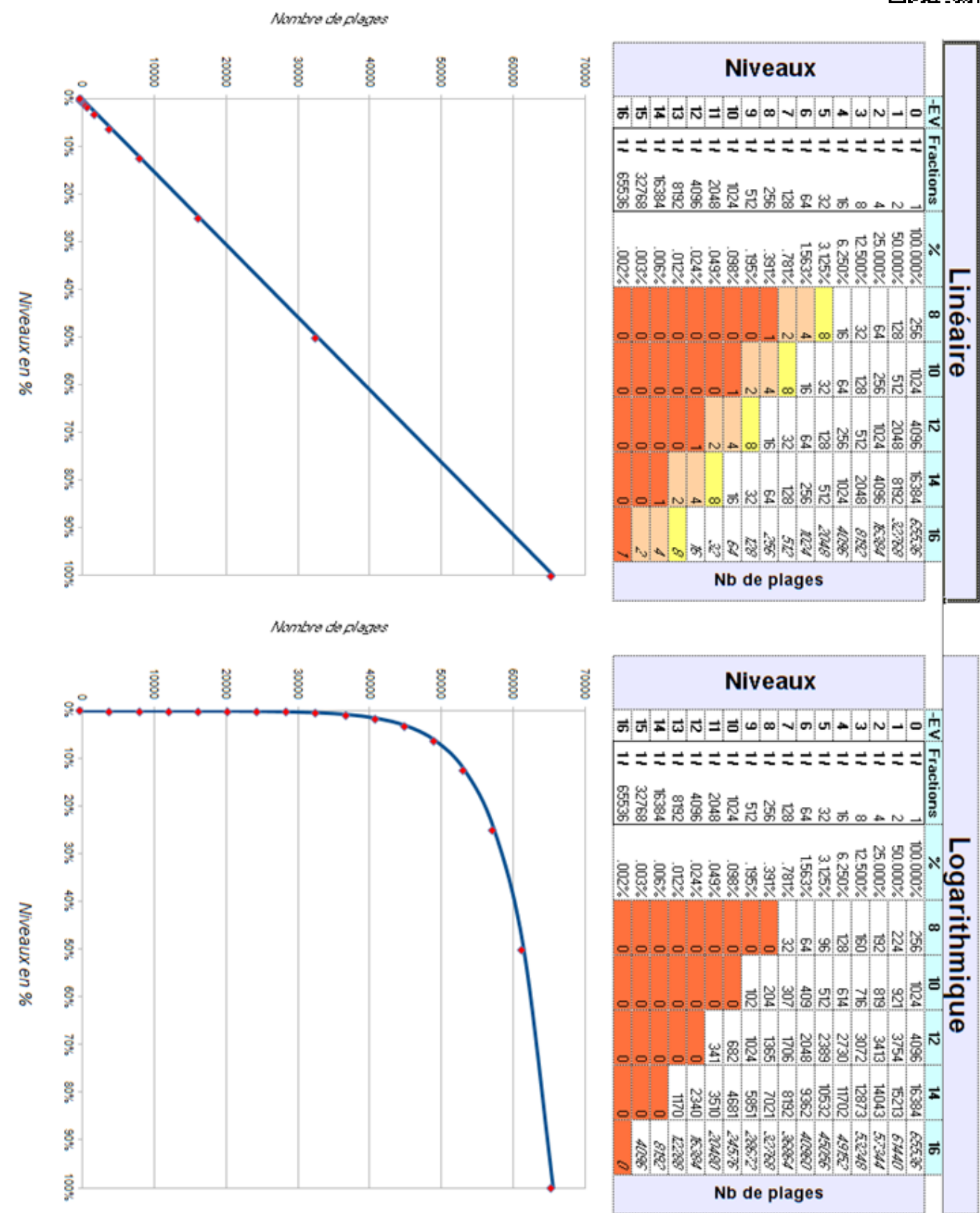
5. Dans le cas d'une réflexion diffuse nous avons : $\text{luminance} = (\text{éclairage} \times \text{albédo}) / \pi$
Si la réflexion est spectrale, on a : $\text{luminance} = \text{éclairage} \times \text{albédo}$.

le plus élevé possible. Cela explique également aussi tout l'intérêt d'une courbe de type log ou, à défaut, d'une courbe de gamma (figure 16).

Une table de correspondance EV pour une cellule Sekonic Master 1^{ère} génération est à télécharger [ici](#).

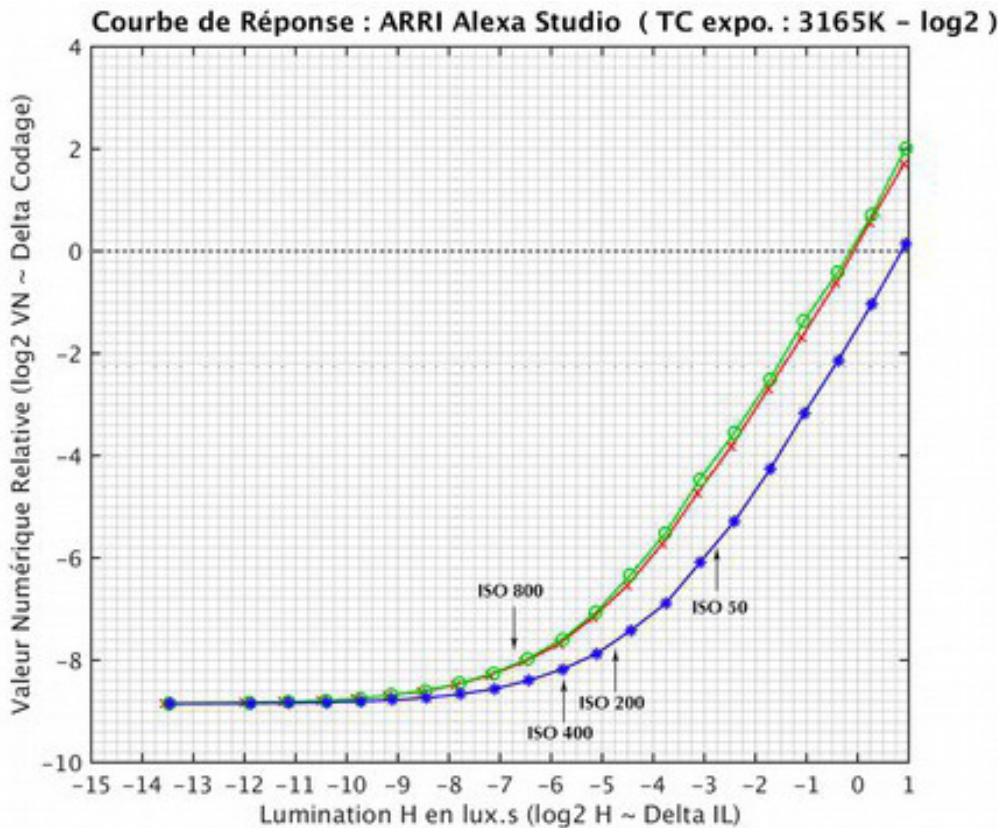
Un tutoriel sur les logs peut être téléchargé [ici](#).

Avec la courbe OETF obtenue par la méthode de Alain Sarlat, il suffit de lire sur le graphe le nombre de valeurs EV disponibles entre la plage se distinguant suffisamment du bruit pour être exploitable et le point de saturation (figure 17).



Vous pouvez télécharger l'intégralité du fichier [ici](#).

▲ Figure 16



► Figure 17
Mesures réalisées par Eléna Erhel

C MÉTHODE DÉVELOPPÉE PAR BAPTISTE MAGNIEN

La méthode imaginée par Baptiste Magnien pour évaluer la sensibilité et l'étendue utile d'un appareil photo présente l'avantage de n'utiliser qu'un matériel rudimentaire : éclairage, charte de gris et cellule.

1 Dispositif expérimental

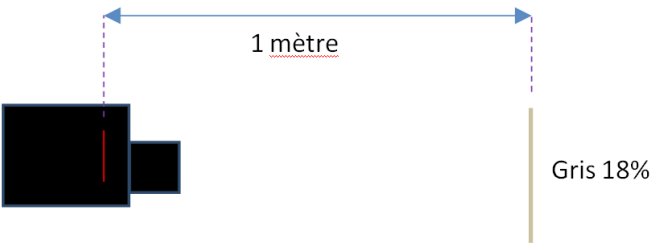
La méthode consiste à photographier une charte de gris à 18 % (figure 18). L'ouverture (diaphragme) et la sensibilité affichés sont fixes. On fait varier l'exposition en changeant le temps de pose de 1/3 en 1/3 de valeur EV.

Les valeurs trouvées sur l'image sont lues avec la pipette dans After Effects, Photoshop (pour lecture des valeurs dématricées en RVB) ou Raw Digger (pour lecture directe des valeurs du Raw).

- Appareil testé : Nikon D810, équipé d'un objectif Nikon 50 mm
- Les prises de vues ont été faites à deux sensibilités affichées sur l'appareil, 100 ISO et 800 ISO, soit un écart de 3 EV.
- Diaphragme fixe affiché sur l'objectif : 2 + 2/3
- Les différentes expositions ont été faites en faisant varier le temps de pose entre 1/8000 s et 15 s, soit 17 EV, chaque variation du temps de pose correspondant à 1/3 d'EV.
- Pour chaque série d'essais il y a donc 51 valeurs d'expositions.
- L'exposition dite "normale", ou key light, c'est à dire celle correspondant à la sensibilité choisie, est :

Pour 100 ISO, 1/6 s à Ø 2 + 2/3
Pour 800 ISO, 1/50 s à Ø 2 + 2/3

Les fichiers RAW ont été analysés via Raw Digger et tracés sous Excel.



► Figure 18
Dispositif expérimental.

Plaque de poly



2 Tableaux et courbes

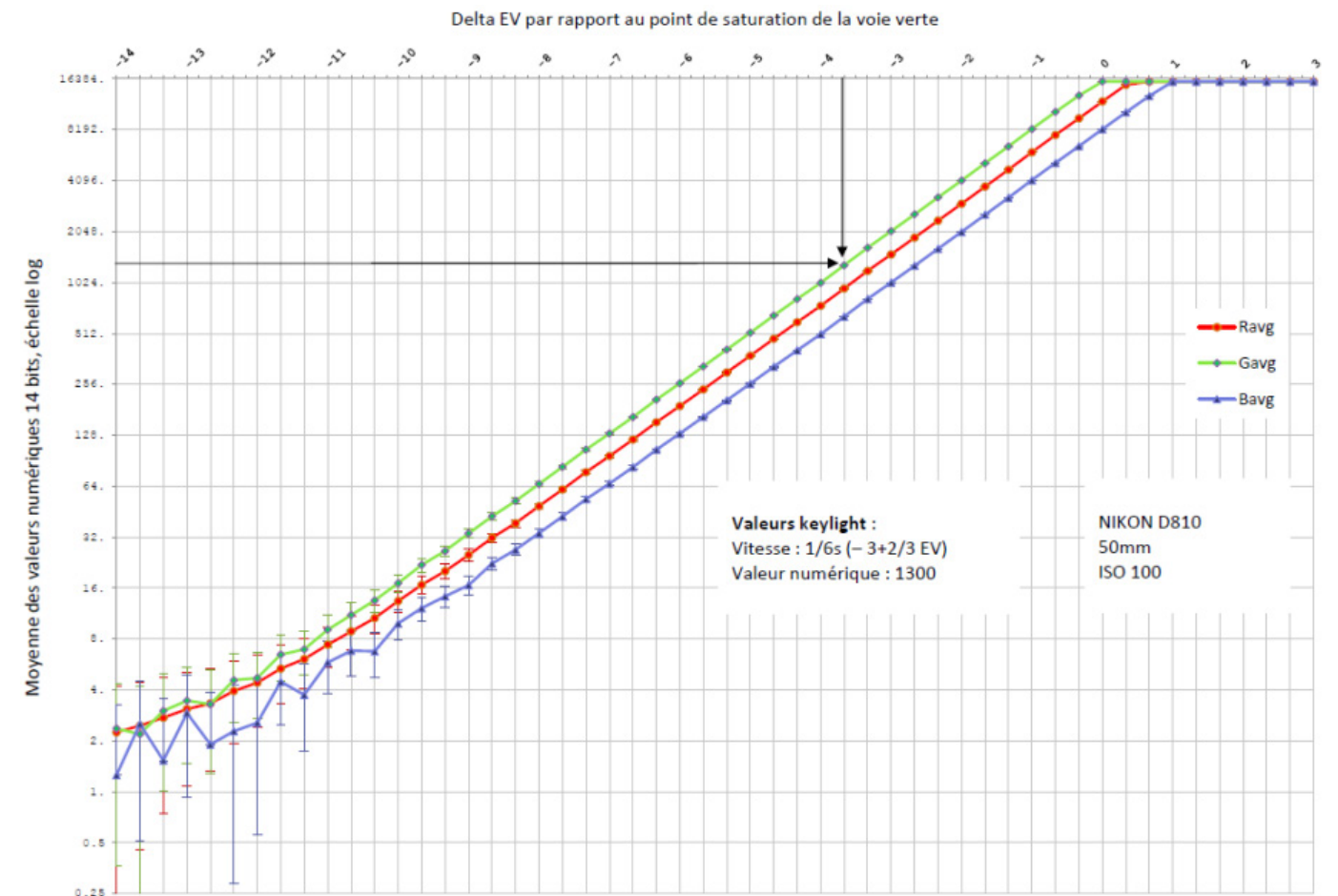
100 ISO, 50 mm f3.2 KL = 1/6 s

Vitesse en s	Delta EV	Rouge	Vert	Bleu
1/8000	-10.33	2.25	2.37	1.25
1/6400	-10.	2.46	2.19	2.52
1/5000	-9.67	2.74	3.01	1.53
1/4000	-9.33	3.08	3.46	2.92
1/3200	-9.	3.33	3.29	1.90
1/2500	-8.67	3.94	4.57	2.29
1/2000	-8.33	4.42	4.71	2.56
1/1600	-8.	5.35	6.48	4.48
1/1250	-7.67	6.09	6.95	3.74
1/1000	-7.33	7.42	9.09	5.83
1/800	-7.	8.89	11.10	6.84
1/640	-6.67	10.64	13.53	6.77
1/500	-6.33	13.42	17.11	9.89
1/400	-6.	16.72	21.95	12.16
1/320	-5.67	20.14	26.50	14.30
1/250	-5.33	25.12	33.71	16.66
1/200	-5.	31.70	42.52	22.37
1/160	-4.67	38.70	52.39	27.00
1/125	-4.33	48.77	66.01	33.80
1/100	-4.	61.24	83.29	42.36
1/80	-3.67	77.47	105.32	53.66
1/60	-3.33	96.51	131.12	66.46
1/50	-3.	120.78	164.11	83.04
1/40	-2.67	152.82	208.06	105.27
1/30	-2.33	190.65	260.02	131.10
1/25	-2.	239.07	326.59	164.29
1/20	-1.67	300.87	411.40	206.04
1/15	-1.33	377.94	517.17	258.16
1/13	-1.	476.29	652.45	325.46
1/10	-0.67	597.23	817.93	407.46
1/8	-0.33	745.64	1 019.80	507.29
1/6	0	944.00	1 293.17	643.55
1/5	0.33	1 198.85	1 644.20	818.42
1/4	0.67	1 499.43	2 059.54	1 024.33
0.3	1.	1 886.37	2 590.86	1 287.60
0.4	1.33	2 376.28	3 263.02	1 621.94
0.5	1.67	2 990.45	4 105.30	2 038.77
0.6	2.	3 775.92	5 184.06	2 576.31
0.8	2.33	4 752.69	6 520.30	3 244.20
1	2.67	6 030.55	8 269.85	4 124.81
1.3	3.	7 625.44	10 436.87	5 215.02
1.6	3.33	9 565.99	13 057.84	6 546.60
2	3.67	12 039.63	15 781.48	8 264.81
2.5	4.	15 087.51	15 781.59	10 391.26
3.2	4.33	15 780.58	15 781.59	12 963.55
4	4.67	15 780.51	15 781.55	15 780.16
5	5.	15 780.49	15 781.55	15 780.23
6	5.33	15 780.49	15 781.90	15 781.18
8	5.67	15 780.43	15 781.48	15 780.14
10	6.	15 780.36	15 781.83	15 780.06
13	6.33	15 780.30	15 781.37	15 780.00
15	6.67	15 780.21	15 781.71	15 781.00

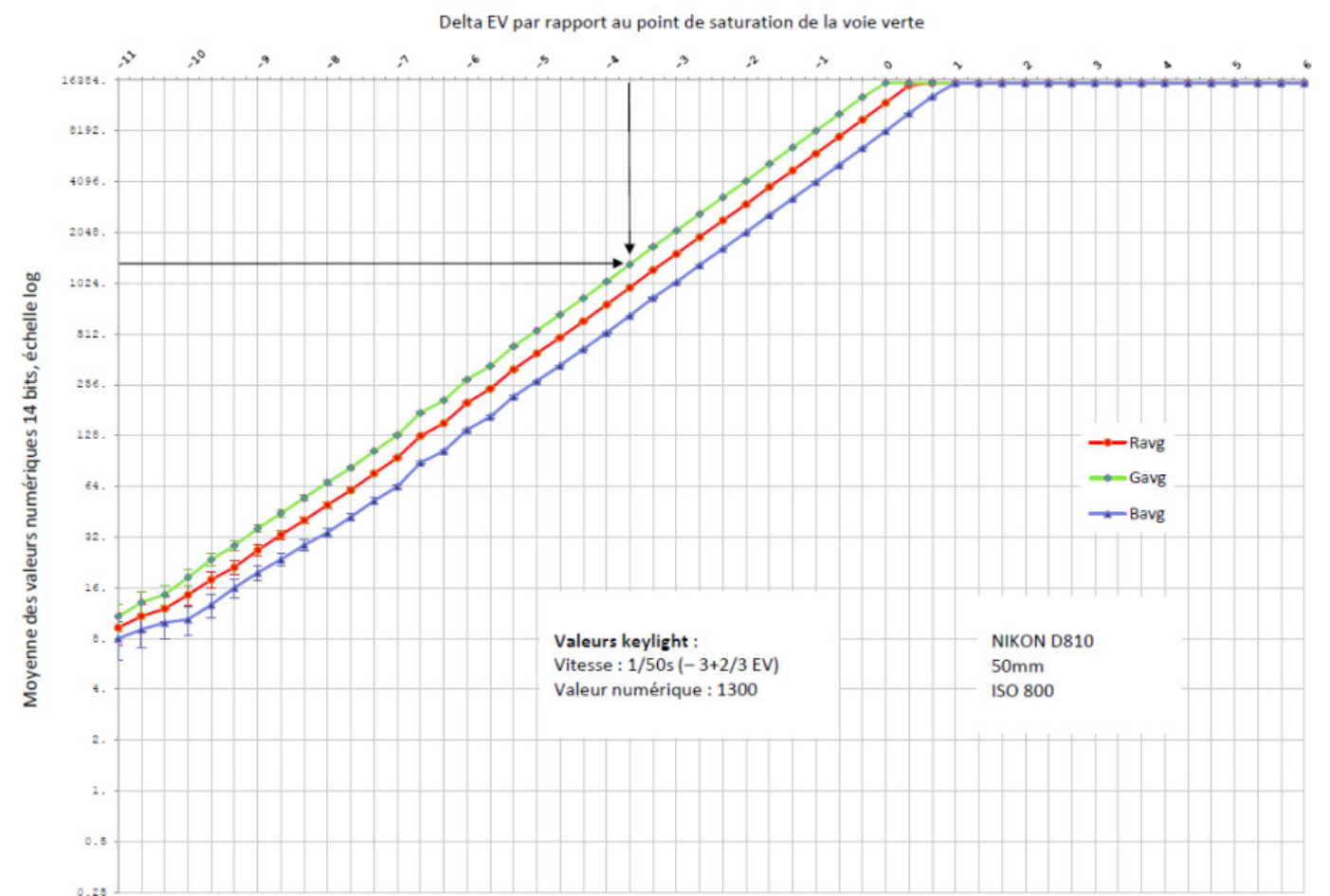
▲ Tableau 3
Tableaux des valeurs numériques moyennes. Le delta EV est calé sur le KL du gris à 18%.

800 ISO, 50 mm f3.2 KL = 1/50 s

Vitesse en s	Delta EV	Rouge	Vert	Bleu
1/8000	-7.33	9.27	10.78	7.99
1/6400	-7.	10.85	13.11	9.04
1/5000	-6.67	12.02	14.54	9.92
1/4000	-6.33	14.49	18.42	10.38
1/3200	-6.	17.87	23.50	12.66
1/2500	-5.67	21.15	28.39	15.98
1/2000	-5.33	26.76	35.93	19.67
1/1600	-5.	32.88	44.24	23.56
1/1250	-4.67	40.21	54.53	28.63
1/1000	-4.33	49.55	67.33	33.98
1/800	-4.	60.65	82.20	41.99
1/640	-3.67	76.05	103.39	52.55
1/500	-3.33	94.33	128.32	63.69
1/400	-3.	127.32	174.34	88.31
1/320	-2.67	151.30	206.65	103.28
1/250	-2.33	199.78	274.75	138.22
1/200	-2.	241.91	330.50	165.30
1/160	-1.67	315.21	432.52	217.71
1/125	-1.33	392.83	535.77	268.69
1/100	-1.	486.88	666.63	333.10
1/80	-0.67	609.23	834.02	415.84
1/60	-0.33	764.28	1 047.11	520.08
1/50	0	963.41	1 322.46	657.19
1/40	0.33	1 226.53	1 686.12	838.78
1/30	0.67	1 528.19	2 096.88	1 040.83
1/25	1.	1 920.45	2 635.16	1 309.39
1/20	1.33	2 413.91	3 311.93	1 644.84
1/15	1.67	3 013.68	4 132.00	2 050.70
1/13	2.	3 814.94	5 228.87	2 597.05
1/10	2.33	4 772.63	6 536.80	3 251.36
1/8	2.67	6 007.95	8 209.15	4 084.39
1/6	3.	7 565.04	10 317.67	5 136.23
1/5	3.33	9 550.23	13 007.18	6 480.26
1/4	3.67	12 028.55	15 782.19	8 185.86
0.3	4.	15 262.19	15 783.00	10 411.52
0.4	4.33	15 782.00	15 783.00	13 119.86
0.5	4.67	15 782.00	15 783.00	15 781.45
0.6	5.	15 782.00	15 783.00	15 782.00
0.8	5.33	15 782.00	15 783.00	15 782.00
1	5.67	15 782.00	15 783.00	15 782.00
1.3	6.	15 778.74	15 779.70	15 777.80
1.6	6.33	15 778.58	15 779.69	15 777.81
2	6.67	15 778.51	15 779.90	15 777.77
2.5	7.	15 778.40	15 779.59	15 777.62
3.2	7.33	15 778.30	15 779.67	15 777.52
4	7.67	15 778.22	15 779.30	15 777.54
5	8.	15 778.77	15 779.50	15 777.26
6	8.33	15 778.46	15 779.25	15 777.80
8	8.67	15 778.20	15 779.61	15 778.34
10	9.	15 778.63	15 779.37	15 777.31
13	9.33	15 778.28	15 779.38	15 777.55
15	9.67	15 778.44	15 779.46	15 777.61



▲ Figure 19. Courbes RGB Nikon D810 à 100 ISO avec un 50 mm.



▲ Figure 20. Courbes RGB Nikon D810 à 800 ISO avec un 50 mm.

—■ 3 Analyses et interprétations

Pour l’analyse des courbes et pour les calculs de sensibilités, cette méthode se base sur la courbe verte conformément à la sensibilité spectrale de l’œil. Pour la détermination du niveau de bruit dans les basses lumières, elle analyse les trois courbes.

Les deux courbes, 100 ISO et 800 ISO, sont parfaitement parallèles, elles sont décalées sur l’axe horizontal de trois EV.

Dans les deux cas, le Keylight, c’est-à-dire le temps d’exposition nécessaire pour obtenir un diaphragme de Ø 2 + 2/3 à 1/6 s pour 100 ISO, 1/50 s pour 800 ISO, donne la même valeur de codage numérique, 1300, et dans les deux cas ce point est situé à 3 EV 2/3 en dessous du point de saturation.

La sensibilité ISO affichée n’est pas une métadonnée, c’est en fonction de cette sensibilité que l’appareil place le 18 % et le point de saturation. Il n’est donc pas possible de déterminer la sensibilité native du capteur. En revanche il est possible de choisir la position du 18%. En travaillant avec la sensibilité affichée sur l’appareil, le 18 % sera à 3 EV 2/3 sous le point de saturation. En travaillant avec un ISO d’un EV plus élevé que celui affiché sur l’appareil, le 18 % sera à 4 EV 2/3 sous le point de saturation, ce qui fera gagner un EV de latitude dans les hautes lumières, mais en fera perdre un dans les basses, l’étendue utile restant la même. Il est possible, bien-sûr, d’augmenter la latitude vers les basses lumières en choisissant une sensibilité moins forte mais dans ce cas là, c’est dans les hautes qu’on aura moins de marge de manœuvre.

Sur le graphe 100 ISO les trois courbes restent cohérentes jusqu’à -10 EV, point à partir duquel la courbe du bleu commence à dévier. À -10 EV 2/3, le bruit dans le bleu devient “inacceptable”. On pourrait donc considérer que l’étendue utile de cet appareil réglé sur 100 ISO est 10 EV 2/3.

Sur le graphe 800 ISO, le niveau de bruit est difficilement repérable, il nous manque des informations dans les basses lumières. Cela étant, on constate une cassure à -10 EV sur la courbe bleue, on pourrait donc dire que l’étendue utile est de 10 EV.

Cependant, à 800 ISO comme à 100 ISO, il est tout à fait possible de rajouter un EV dans les basses lumières. Tout dépend de l’éclairage général de la photo, de la couleur dominante dans les basses lumières, du cadre, et du goût du photographe.

Toutes ces mesures ont été faites à partir des fichiers Raw.

En argentique, le sensitogramme est mesuré après développement de la pellicule. Pour cette raison, Baptiste Magnien a aussi fait des mesures à partir des fichiers TIFF ou JPEG après dématricage dans l’appareil. On obtient, dans ce cas-là, des courbes qui se rapprochent plus de la courbe caractéristique du film argentique, en particulier au niveau du pied de courbe.

D DÉTERMINATION DE LA SENSIBILITÉ SELON LES DONNÉES CONSTRUCTEUR

Parfois le constructeur préconise un diaphragme pour un éclairciment donné en lux et pour un temps de pose de 1/50^{ème} de seconde.

On peut appliquer la formule suivante :

$$EV = \log_2 (E / b) \quad \text{avec } b = 3,3$$

$$ISO = \text{arrondi} (500 \times N^2 / (6 \times 2^{(EV-6)})$$

E : éclairciment en lux

N : ouverture préconisée par le constructeur

b : facteur dépendant de l’étalonnage du posemètre et de son diffuseur

On peut également se rappeler du tableau suivant au 1/50^{ème} :

ISO	Diaph	Lux
100	2.8	1000

On peut donc, par proportionnalité, si on connaît le nombre de lux et l’ouverture, en déduire la sensibilité.

E LA CARACTÉRISATION DU BRUIT

La courbe de réponse extraite du RAW ne prend pas en compte la possibilité de traitement du bruit. Pour quantifier le bruit, on peut effectuer le calcul de l’écart type des valeurs de chaque plage au sein d’une image et entre plusieurs images, et on définit une différence de lumination acceptable entre deux pixels pour que l’information soit lisible. On définit ainsi la lumination à partir de laquelle la caméra est capable de restituer « correctement » l’information. Notons que la quantité de bruit acceptable est une notion totalement subjective qui dépend de choix esthétiques et de la nature même du sujet.

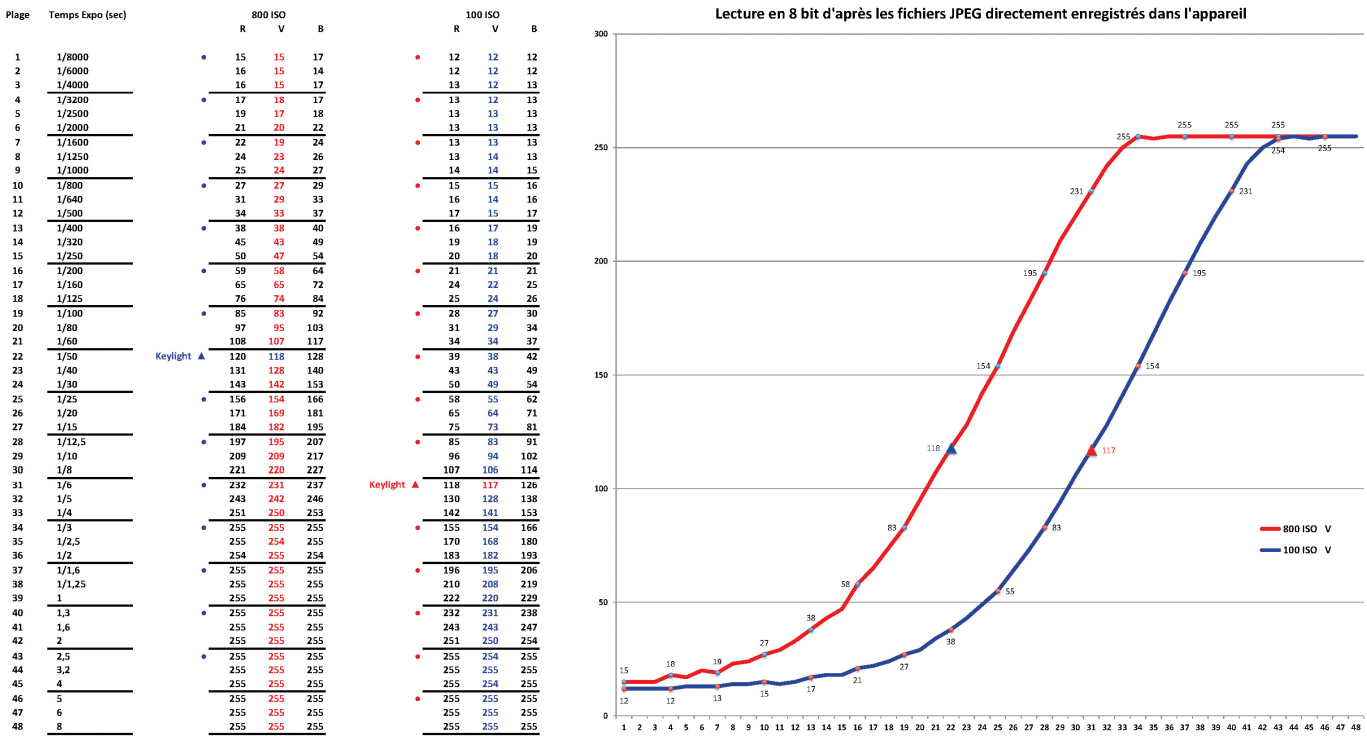
De plus, si une norme ISO 12232 définit le bruit pour les capteurs photo, elle n’est pas applicable aux caméras car la succession des images dissimule le bruit sur une image animée : en photo argentique 24x36 un agrandissement A3, A2 ou A1 constitue une bonne performance mais une image film argentique 35 mm, deux fois plus petite, se projette, elle, aisément sur un écran de 6 m de base. De même, en vidéo, la succession des images et le bruit inter image tendent à dissimuler le bruit intra image.

F LA MESURE DE RÉPONSE SPECTRALE

La mesure de réponse spectrale s’effectue via une source OL490 Agile Light Source. Cette source spectrale programmable est constituée d’une lampe Xénon et d’un réseau de diffraction, en face duquel se trouve une matrice à micro-miroirs de type DLP. Le réseau va décomposer la lumière en un spectre que le système optique et la matrice DLP vont recomposer selon une table programmable avec une résolution de 5 nm (figure 21).

La matrice DLP peut être pilotée via une interface USB contrôlée par un logiciel pour reproduire le plus fidèlement possible la table d’un illuminant standard D65 ou celle d’un illuminant A ou toute autre table, en particulier correspondant au corps noir à une température donnée. Pour reproduire les extrémités du spectre, UV et IR, ce dispositif peut être complété d’une source au deutérium (UV) et d’une simple lampe à incandescence (IR).

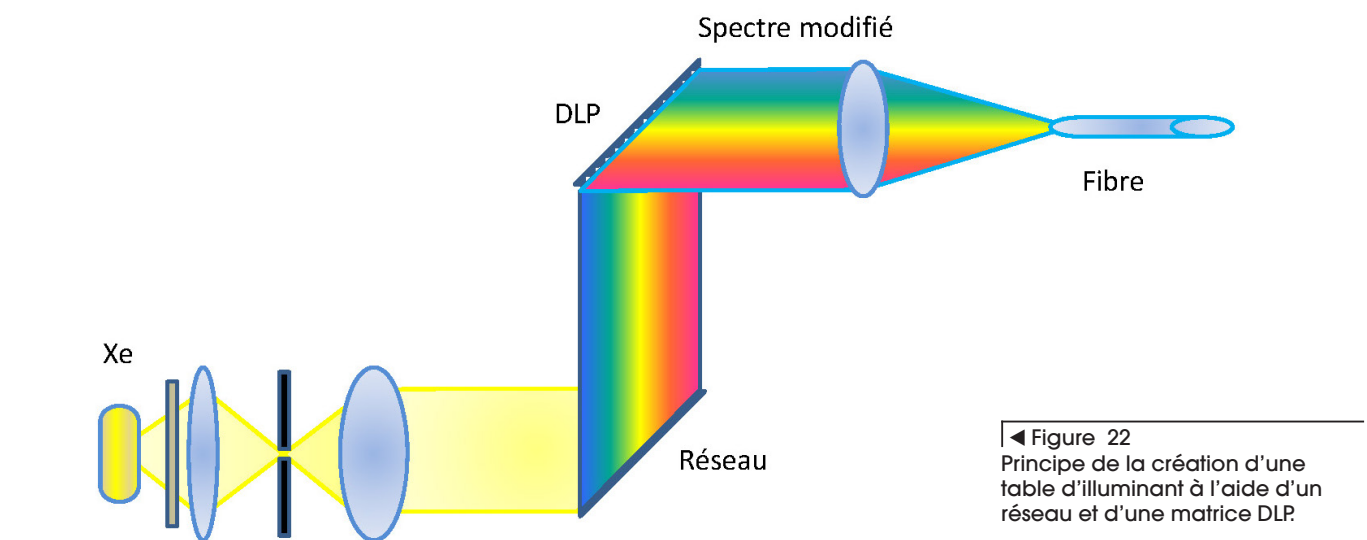
La lecture directe des valeurs numériques R, G, B dans le fichier RAW, via un script Matlab, va permettre de tracer trois courbes R, G et B. On cale les courbes des valeurs du rouge et du bleu sur la courbe des valeurs du vert qui constituera le 100%, ces courbes étant donc relatives à cette dernière, ceci conformément à la sensibilité spectrale de l’œil humain moyen. La courbe verte apparaîtra donc comme une droite horizontale, les courbes vertes et bleues représentant des pourcentages de cette dernière. Si les trois courbes se croisent, on peut estimer



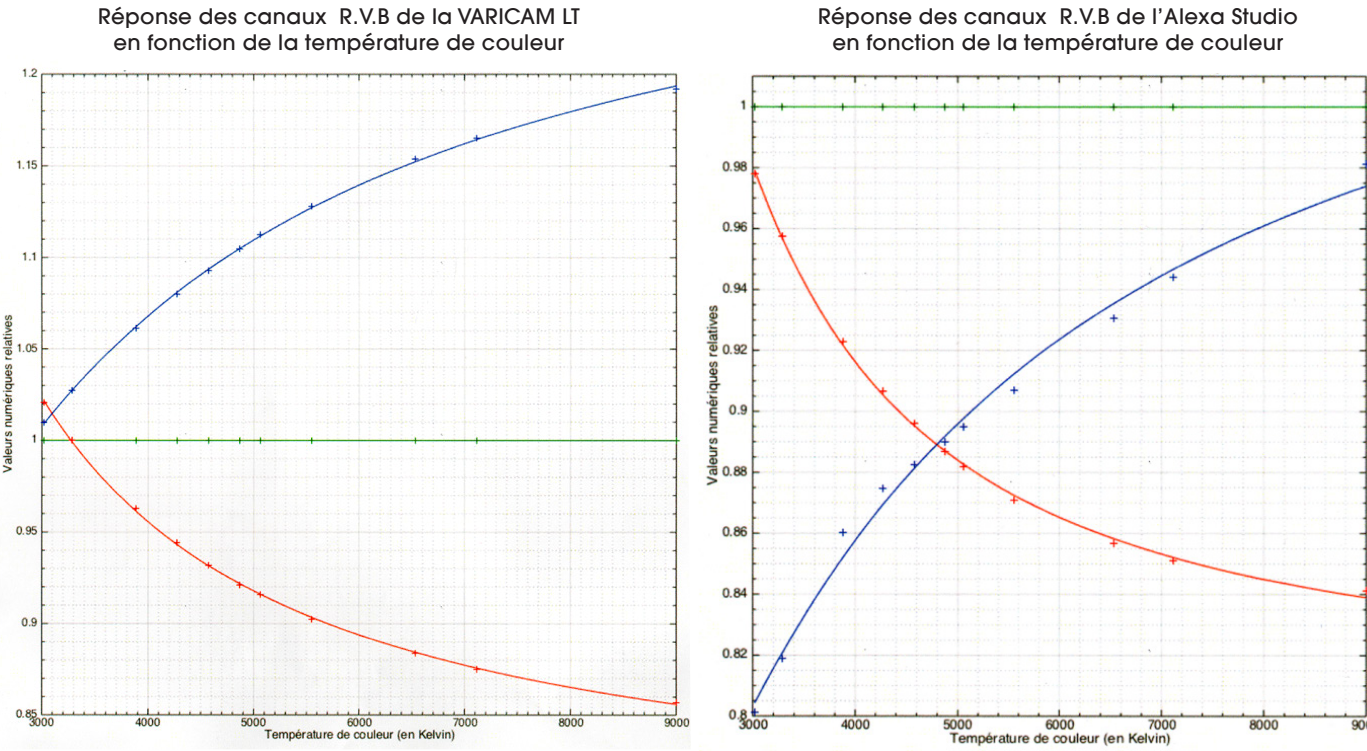
▲ Figure 21. Courbes vertes Nikon 810 à 100 et 800 ISO avec un 50 mm.

qu'on se trouve à la température de couleur idéale du capteur, celle générant a priori le moins de bruit. Une seule caméra, la Varicam LT, répond à ce critère (figure 22).

Il est important de noter, pour éviter une confusion souvent relevée, que les différents gamuts proposés par les fabricants Sony S-Gamut, Varicam V-Gamut, RED RWG ou même l'espace ACES, ne correspondent en rien à l'espace réel d'analyse d'un capteur mais sont des espaces de travail et de calcul capables d'englober l'espace de la caméra, qui reste à définir, et, si possible, tous les espaces de destination : rec 2020, DCI P3 ou rec 709. En effet les longueurs d'onde invisibles pour l'œil humain ne peuvent se situer que dans le prolongement du fer à cheval représentant le spectrum locus, correspondant à l'emplacement des lumières monochromatiques ou encore spectrales, et cela à droite dans le domaine de l'infrarouge et à gauche dans celui de l'ultraviolet. Les primaires retenues au-delà de cette ligne et situées donc à l'extérieur du fer à cheval, sont des primaires virtuelles qui ne correspondent à aucune radiation électromagnétique existante.



Notons qu'il serait tout à fait illusoire de vouloir tracer le gamut d'analyse de la caméra. En effet, supposons que nous puissions construire des filtres extrêmement sélectifs correspondant chacun à une seule longueur d'onde identique à chaque primaire du rec 2020 : la caméra serait alors totalement aveugle à tout se qui se situe en dehors de ces trois longueurs d'onde. Tout comme pour l'argentique il faut donc que la bande passante des trois filtres R, G, B soit relativement large et même qu'il y ait une légère zone de recou-



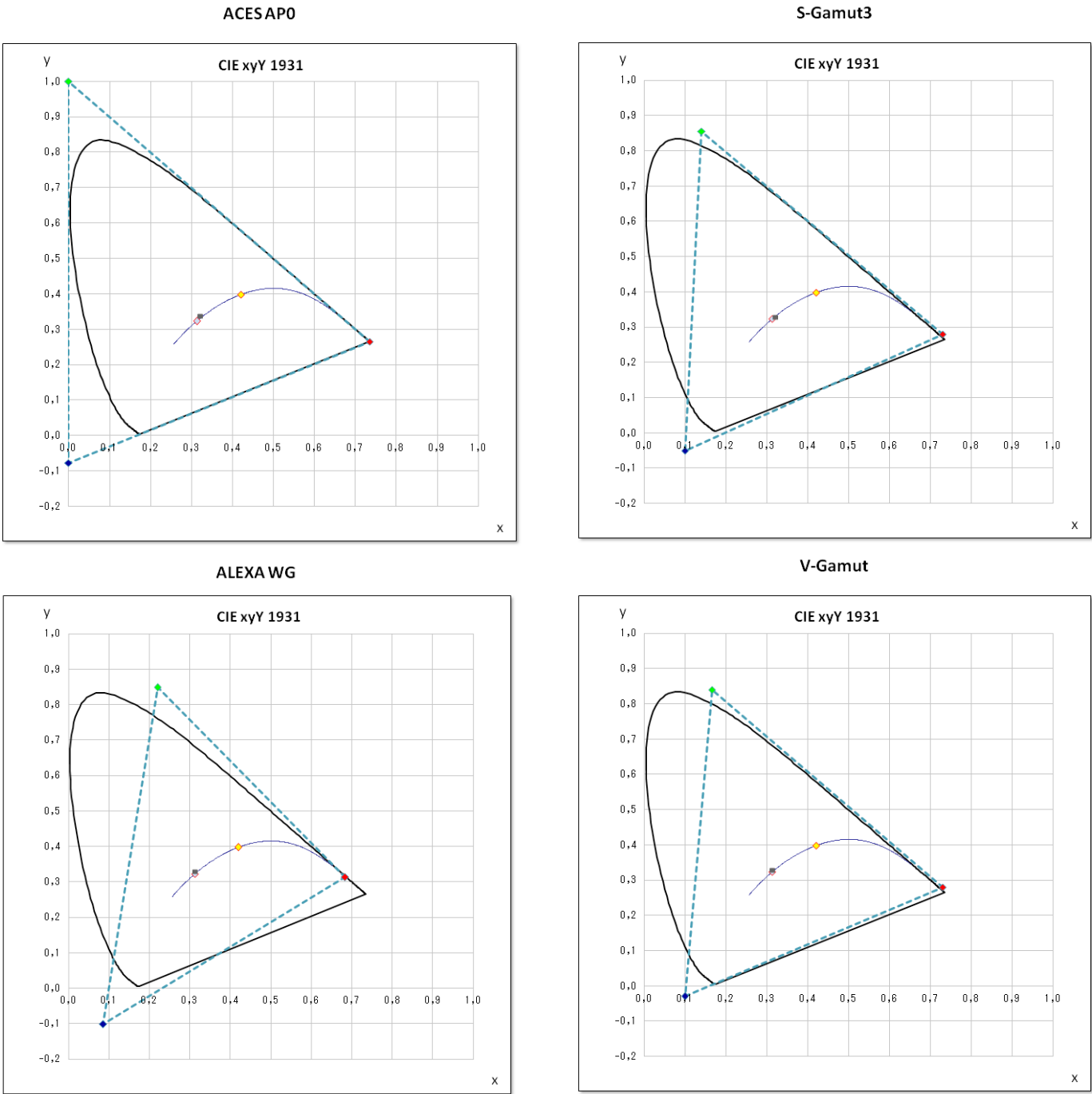
▲ Figure 23. Exemples de réponses de caméras selon la Température de Couleur.

vement pour ne pas laisser de trous dans l'analyse spectrale. Un gamut ne correspond en réalité qu'à un espace de travail ou à un système d'affichage considéré soit seul, soit intégré avec toute la chaîne de traitement amont. On peut fort bien reproduire les couleurs à l'aide de trois primaires monochromatiques de type laser, nos cônes L, M et S recevant chacun une information et travaillant par antagonisme avec les autres récepteurs, mais on ne pourrait ni éclairer, ni construire une caméra selon un tel modèle (figure 23).

Une feuille sur les gamuts se trouve [ici](#). Il est nécessaire de la télécharger, puis de l'exécuter sous Excel, des fonctions étant écrites en VBA.

Le principal problème de reproduction des couleurs sera posé par les zones de recouvrement, nécessaires mais qu'il faut limiter pour obtenir une séparation des primaires efficace tout en évitant le métamérisme (figures 24 et 25).

La courbe de sensibilité spectrale constitue un indicateur significatif. Il reste également la possibilité pour l'opérateur de filmer une charte XRite, sous un éclairage de référence, et d'établir ensuite un profil d'entrée (IDT dans le système ACES), ce que des logiciels comme [Da Vinci Resolve](#) permettent de faire très bien. C'est un plus indéniable dans la chaîne de gestion de couleurs.



▲ Figure 24. Exemples d'espaces colorimétriques dits gamuts.



5 CONCLUSION

Ces méthodes d'évaluation des caractéristiques d'un capteur se ressemblent par bien des points.

Dans tous les cas, à la suite d'une prise de vue, on trace une courbe dont l'abscisse est le log de la lumination et l'ordonnée la valeur numérique du signal.

Il y a cependant quelques variations importantes :

- Prise de vue avec ou sans objectif ;
- Mesure de la sensibilité à partir du point de saturation ou à partir du niveau de bruit ;
- Analyse du fichier raw (méthode d'Alain Sarlat) ou du fichier numérique débayerisé.

Le choix de la méthode dépend principalement de la stratégie d'exposition :

- Lorsque les conditions d'éclairage sont contrôlées, comme lors d'une prise de vues en studio, les indices d'exposition sont sélectionnés pour donner la meilleure image possible, avec les hautes lumières de l'image tombant juste en dessous du point de saturation. Ce type de situation d'exposition est décrit par l'indice ISO basé sur la saturation ;
- Lorsque les conditions d'éclairage sont inférieures aux conditions idéales, un indice ISO basé sur le bruit est plus utile. Dans ce calcul, le rapport signal sur bruit (SNR) est utilisé pour calculer l'indice ISO ;
- Si on tourne en raw, la méthode d'Alain Sarlat pourrait être la plus appropriée.

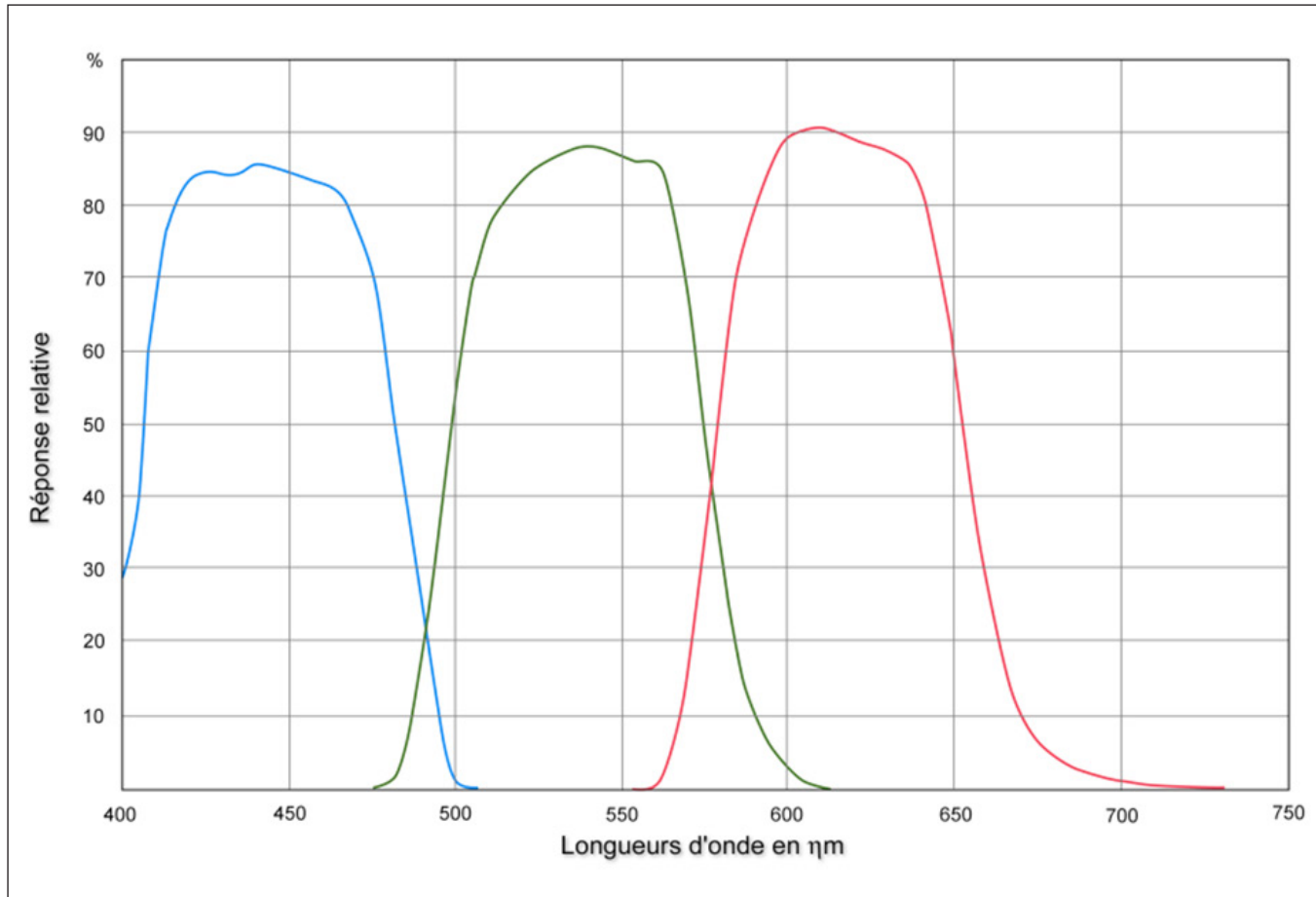
En fonction de la méthode choisie, les courbes peuvent donner des sensibilités différentes.

Dans ces conditions, il paraît difficile de déterminer précisément un indice ISO à afficher sur la cellule.

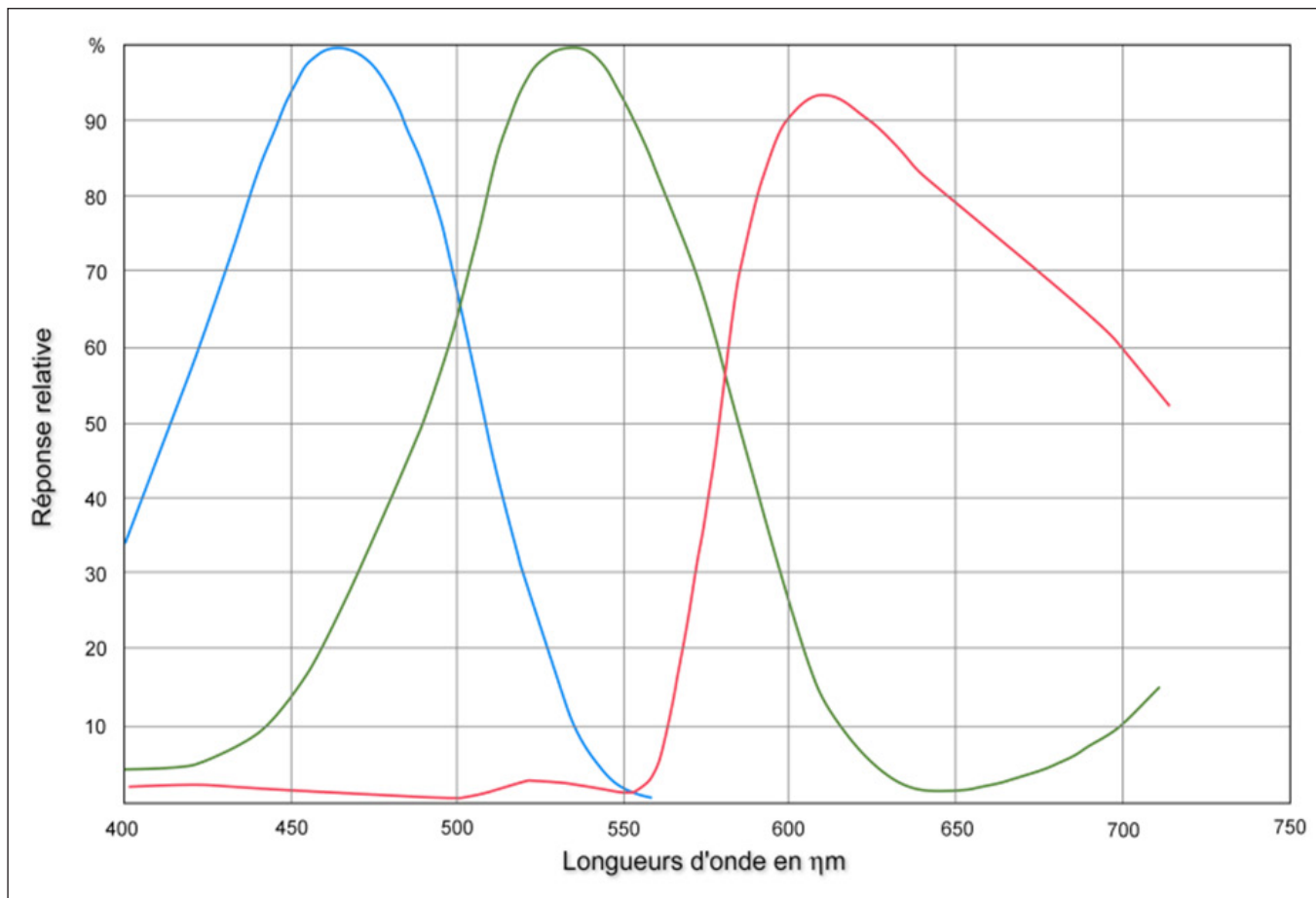
Cependant, outre la sensibilité, ces courbes et ces tableaux nous donnent d'autres informations importantes sur le capteur :

- Le point de saturation dans les hautes lumières ;
- Le niveau de bruit acceptable dans les basses lumières ;
- L'étendue utile entre ces deux niveaux de lumination.

C'est l'interprétation par le directeur photo de toutes ces données qui lui permettront d'ajuster au mieux l'exposition en fonction des conditions de tournage.



▲ Figure 25. Réponse spectrale d'une caméra tri CCD à séparateur à prismes.



▲ Figure 26. Réponse spectrale d'une caméra mono CCD grand public.

A INDICES EV / IL

L'échelle des indices EV (exposure value), ou encore IL (indice de lumination), pour 100 ISO constitue une échelle logarithmique en base 2 : dans tous les cas un écart de 1 EV correspond à 1 diaph. Cette échelle permet de calculer les ouvertures et les temps de pose sur les posemètres (cellules photométriques).

1 Calcul de l'indice EV pour 100 ISO

$2^{EV} = N^2/t = L_m \times S/k$
Ou encore :
 $Ev = \log_2 (N^2/t)$ soit $Ev = 2 \log_2 (N) - \log_2 (t)$
N : valeur photométrique de l'iris sans unité
t : temps d'exposition en seconde
 L_m : luminance du gris à 18 % en cd/m²
S : sensibilité sur l'échelle ISO
k : constante d'étalonnage (elle peut varier de 10,5 à 14, l'ISO recommande 12,5)

2 Rapport de contraste EV et linéaire

Écart EV	Rapport contraste
1	2:1
1.5	3:1
2	4:1
3	8:1
4	16:1
5	32 :1
6	64 :1
7	128 :1
8	256 :1
9	512 :1
10	1 024 :1
11	2 048 :1
12	4 096 :1
13	8 192 :1
14	16 384 :1
15	32 768 :1
16	65 366 :1

3 Table des indices EV pour 100 ISO (Sekonic Cine Master)

Positionner la cellule sur 100 ISO			
Lux		Cd/m²	
INCIDENTE		SPOTMETRE	
EV à 100 ISO > Lux		EV à 100 ISO > Cd/m²	
EV	LUX	EV	Cd/m²
- 2	0.63	- 2	0.03
-1.5	0.88	-1.5	0.04
-1	1.25	-1	0.06
- 0.5	1.77	- 0.5	0.09
0	2.50	0	0.13
0.5	3.54	0.5	0.18
1	5	1	0.25
1.5	7	1.5	0.35
2	10	2	0.5
2.5	14	2.5	0.71
3	20	3	1
3.5	28	3.5	1.41
4	40	4	2
4.5	57	4.5	2.83
5	80	5	4
5.5	113	5.5	5.66
6	160	6	8
6.5	226	6.5	11
7	320	7	16
7.5	453	7.5	23
8	640	8	32
8.5	905	8.5	45
9	1 280	9	64
9.5	1 810	9.5	91
10	2 560	10	128
10.5	3 620	10.5	181
11	5 120	11	256
11.5	7 241	11.5	362
12	10 240	12	512
12.5	14 482	12.5	724
13	20 480	13	1 024
13.5	28 963	13.5	1 448
14	40 960	14	2 048
14.5	57 926	14.5	2 896
15	81 920	15	4 096
15.5	115 852	15.5	5 793
16	163 840	16	8 192
16.5	231 705	16.5	11 585
17	327 680	17	16 384

B CALCUL DE LA SENSIBILITÉ ISO D'UN FILM NÉGATIF COULEUR

On réalise avant tout un sensitogramme qui est analysé ensuite au densitomètre. On obtient les courbes caractéristiques du film négatif, log des luminations/densités. Pour chacune des trois courbes, on détermine les points correspondants à une densité de 0,15 + Support + Voile. On obtient les logs des luminations correspondantes. La lumenation H_{iso} est calculée à partir de la lumenation de la couche verte (HG) et celle de la couche la moins sensible (H_{min}), la plupart du temps la couche rouge, selon la formule :

$$H_{iso} = \sqrt[2]{H_G * H_{min}}$$

ou encore :

$$\log(H_{iso}) = (\log(H_G) + \log(H_{min})) / 2$$

On obtient alors la sensibilité ISO arithmétique :

$$S = \frac{\sqrt[2]{2}}{H}$$

Voir article [Wikipedia sur les indices d'exposition argentiques](#) [ici](#)



C NORME ISO 12231 VOCABULAIRE

—■ 1 Gain

Rapport du taux de changement de sortie (numérique) et du taux de changement du niveau d'entrée (lumination).

—■ 2 Fonction incrémentale du gain

Fonction qui associe à un niveau d'entrée (lumination) un gain.

—■ 3 Incrémentation du signal de sortie

S'obtient en multipliant le niveau d'entrée par le gain.

—■ 4 Bruit de sortie

Fluctuation d'un écart-type autour de la moyenne de sortie numérique pour un niveau d'entrée constant donné.

—■ 5 Limite d'exposition maximale

Lumination située juste en-dessous de celle qui produit un niveau de sortie numérique correspondant au maximum d'exposition détectable, appelé aussi saturation.

—■ 6 Limite d'exposition minimale

Lumination la plus faible qui produit une incrémentation du signal de sortie égale, en magnitude, à celle du bruit.

D PIXEL

A l'origine le pixel a été défini comme le plus petit élément d'une image numérique matricielle dite aussi bitmap ou raster. Le mot pixel est apparu en 1969 forgé depuis l'anglais à partir de pix (variante de pics, pluriel de pic, abréviation de picture « image ») et de el(ement) (« élément ») littéralement « élément d'image » à une époque où les capteurs de caméras étaient encore des tubes et où les écrans n'étaient pas plats mais de type CRT.

Une image numérique matricielle est composée de points, ou pixels, codés en noir et blanc ou couleur (RGB ou CMJK ou même YUV) avec ou non une couche de transparence (alpha), sur 8, 16, 32 bits (HDR) par canal. À l'opposée, une image virtuelle vectorielle ne comporte pas de pixels mais est composée d'équations dessinant des courbes, des droites ou toute autre forme et elle est ainsi agrandissable à l'infini sans effet mosaïque.

A l'heure actuelle une certaine confusion règne par rapport à ce terme pixel, utilisé à tout va depuis près de 50 ans : on l'emploie indistinctement pour désigner les photosites, ou photorécepteurs, d'un capteur, les pixels d'une image numérique développée ou les éléments lumineux d'un écran, avec leurs sous-pixels RGB.

Ce qu'il faut savoir, c'est que les deux extrémités de la chaîne peuvent être sujettes à des extrapolations et entretenir ainsi un certain nombre de quiproquos : ainsi on peut filmer en HDCAM 3 : 1 : 1, donc avec seulement 1 440 points par ligne, extrapoler cette image en HD 1920x1080 et projeter le tout sur un écran dit HD ready qui ne comporte en réalité que 720 lignes ! Il est donc important de distinguer ces extrapolations intervenant aux extrémités de la chaîne des pixels vrais codés de l'image numérique.

7 BIBLIOGRAPHIE

Par ordre de parution, du plus récent au plus ancien.

- VOLKER GILBERT,
« Les secrets de la lumière et de l'exposition », Eyrolles, 2017.
- JACQUES GAUDIN,
« Colorimétrie appliquée à la vidéo », 2^e édition, Dunod éditions, 2012.
- JEAN-CHARLES FOUCHÉ,
« Comprendre la vidéo numérique » 2^e édition, CIFAP, 2010.
- HAROLD PHELIPPEAU,
Méthodes et algorithmes de dématricage et de filtrage
du bruit pour la photographie numérique, HAL, 2009. [lien](#)
- JEAN-LOUIS FOURNIER,
« La sensitométrie – Les sciences de l'image appliquées
à la prise de vues cinématographique », Dujarric, 2006.
- CHARLES POYNTON,
« Digital Video and HDTV », Morgan Kaufmann Publishers, 2003.
- ROBERT SÈVE,
« Physique de la couleur – De l'apparence colorée
à la technique colorimétrique », Masson, 2001.



22/24 AVENUE DE SAINT-OUEN

75018 PARIS – FRANCE

Site Internet : www.cst.fr