

Le Mode « Film » des Caméras Numériques

Mémoire de fin d'études de
Karine Aulnette

Sous la direction de
Tony Gauthier

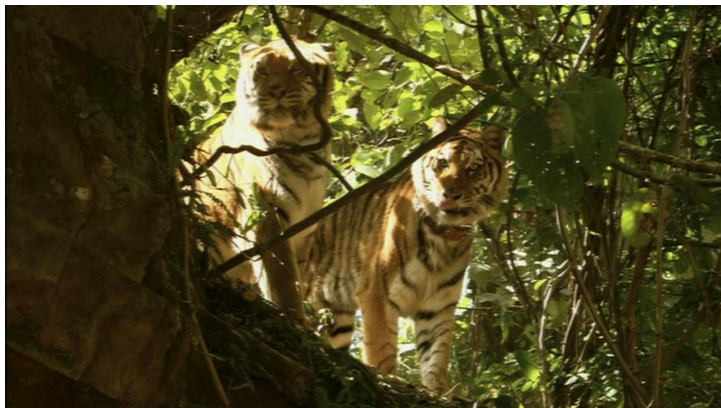
Cinéma 2007
Ecole Nationale Supérieure Louis Lumière

Exposer pour la HD ou une autre vidéo numérique (...) a à peu près les mêmes contraintes de latitude et d'exposition que la pellicule inversible : problèmes avec les hautes lumières et dans les zones d'ombre. (...) C'est comme si on exposait un positif, ou en d'autres termes, une diapositive. »

Ricardo Aronovich, *Exposer une histoire* (2003) ¹

Le chef opérateur Ricardo Aronovich dénonçait en ces termes l'une des contraintes que subissent les chefs opérateurs depuis l'avènement de la captation numérique au cinéma : le manque cruel de latitude d'exposition des caméras utilisées.

Je me souviens de la déception que j'avais eu en 2004 à la vision du film *Deux frères* de Jean-Jacques Annaud. Le film avait été tourné en vidéo haute définition dans les conditions lumineuses extrêmes de la jungle cambodgienne. On y retrouvait les défauts signalés par Aronovich : aplats blancs dans les hautes lumières et noirs charbonneux. Si tel était le futur de la prise de vue numérique, cela me semblait décourageant.



Deux frères de Jean-Jacques Annaud (2004), tourné en Sony F900 et F950, Chef opérateur Jean-Marie Dreujou.

Pour comparer prises de vue argentique et numérique, on avait l'habitude de se cristalliser sur des questions de définition d'image. Mais la latitude d'exposition n'était-elle pas un paramètre non moins important ? Allait-on assister avec l'avènement de la captation numérique au cinéma à un retour en arrière en terme de latitude d'exposition ?

Quelques années plus tard, un film vint me rassurer sur le futur de la captation numérique. Sorti début 2007, *Apocalypto* de Mel Gibson avait été tourné en partie dans la jungle, dans des conditions lumineuses similaires au film de Jean-Jacques Annaud. Mais le rendu des contrastes extrêmes rencontrés se rapprochait à présent du rendu de la prise de vue argentique. La nouvelle caméra numérique utilisée pour le tournage était la Genesis de Panavision.

¹ Ricardo Aronovich, *Exposer une histoire*, Editions Dujarric, 2003, p. 109.

A quelles avancées technologiques importantes devait-on cette différence de rendu entre les deux films ? C'est ce que j'entrepris alors de déterminer.

Je voulais creuser cette idée selon laquelle le signal vidéo se rapprochait de la prise de vue inversible. Dans les deux cas, on obtenait une image immédiatement « projetable » ou affichable, sans besoin d'étape de postproduction. Vouloir capter une image directement « positive » était-il incompatible avec un rendu acceptable des hautes et des basses lumières ? C'est ce que j'ai tenté d'élucider au fil de ces pages.

1. Le problème de la latitude d'exposition au cinéma

Pour comparer captations argentique et numérique, on se cantonne généralement à parler de définition d'image, dans une surenchère de millions de pixels.

La latitude d'exposition est un paramètre non moins important à prendre en compte pour estimer la qualité d'un capteur d'image. Si Ricardo Aronovich en vient à comparer haute définition numérique et pellicule inversible, c'est bien que cette latitude peut poser problème.

Nous allons tenter de déterminer quels sont les paramètres qui influent sur la latitude d'exposition en prise de vue cinématographique. Nous étudierons dans un premier temps la prise de vue argentique, qui pour l'heure constitue la référence. Puis nous lui comparerons le mode de captation numérique. Le but étant de comprendre la cause des problèmes de latitude d'exposition qui se posent en numérique.

Commençons par nous mettre d'accord sur le terme *latitude d'exposition*.

1.1. Ce que nous entendons par « latitude d'exposition »

On ne trouve pas de définition unique de la *latitude d'exposition* dans les ouvrages français consacrés à la photographie, mais plutôt une multitude de définitions, parfois contradictoires. Nous devons lui donner un sens précis pour notre recherche.

Nous désignons ici par **latitude d'exposition** l'écart maximal des luminosités qu'un capteur peut enregistrer, qu'il soit argentique ou numérique. Pour qu'un sujet soit correctement reproduit, il faut que la latitude d'exposition du capteur soit supérieure à l'écart des luminosités du sujet.



Exemple de sujet dont l'écart des luminosités est extrême.

**Photogramme extrait de *La Ligne Rouge* de Terence Malik (1998), tourné en négatif 35 mm.
Directeur de la photographie John Toll**

Les anglo-saxons s'entendent sur le terme *dynamic range* pour désigner ce que nous appelons ici *latitude d'exposition*. Les français parlent tour à tour de *latitude*, de *dynamique*, d'*étendue utile*, de *plage d'exposition*, d'*intervalle de pose*...

J'ai choisi l'expression *latitude d'exposition* car elle est celle qui me semble la moins abstraite.

La latitude de pose

On fait souvent un amalgame entre les termes *latitude d'exposition* et *latitude de pose*. La **latitude de pose** désigne ici la capacité du capteur à accepter une erreur d'exposition. Si on dispose d'une grande latitude d'exposition, elle excède largement le contraste du sujet. On a alors la possibilité de surexposer ou de sous-exposer le sujet, dont l'intervalle de luminosités restera compris dans la latitude d'exposition. On appellera cette possibilité de sous-exposition et de surexposition la **latitude de pose**. L'équivalent anglais pour latitude de pose est *exposure latitude*. On peut le traduire hâtivement par *latitude d'exposition*, ce qui entraîne les confusions signalées.

Ces définitions précisées, nous allons voir quel rôle joue la latitude d'exposition dans la prise de vue argentique. Le mode de captation argentique constituera pour notre étude une référence, car il a déjà fait ses preuves en terme de qualité d'image.

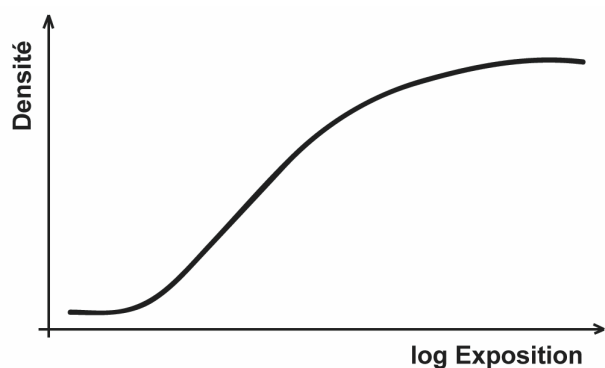
1.2. La latitude d'exposition en argentique

La **sensitométrie** est la science qui étudie l'action de la lumière et du développement sur les pellicules argentiques. Elle nous fournit plusieurs outils graphiques qui vont nous permettre de visualiser ce qu'est la latitude d'exposition.

1.2.1. La courbe sensitométrique

1.2.1.1. Principe

Pour caractériser la réponse d'une pellicule à la lumière, on trace une **courbe sensitométrique**. Cette courbe représente les densités obtenues sur la pellicule développée en fonction de la quantité de lumière reçue.



L'**Exposition** est la quantité de lumière reçue par l'émulsion. Elle se calcule en multipliant l'éclairement par le temps d'exposition.

La **Densité** est le logarithme de l'opacité, l'opacité étant l'inverse de la transmission.

Principe d'une courbe sensitométrique

1.2.1.2. Une représentation logarithmique

On représente la courbe sensitométrique dans un repère de coordonnées logarithmiques : on positionne le log de l'exposition en abscisse, et en ordonnée la densité, qui est elle-même un logarithme. L'intérêt d'une courbe log-log est qu'elle est représentative de la façon dont l'œil perçoit les sensations lumineuses.

On peut comprendre le principe de la fonction logarithme décimal en prenant quelques exemples de valeurs :

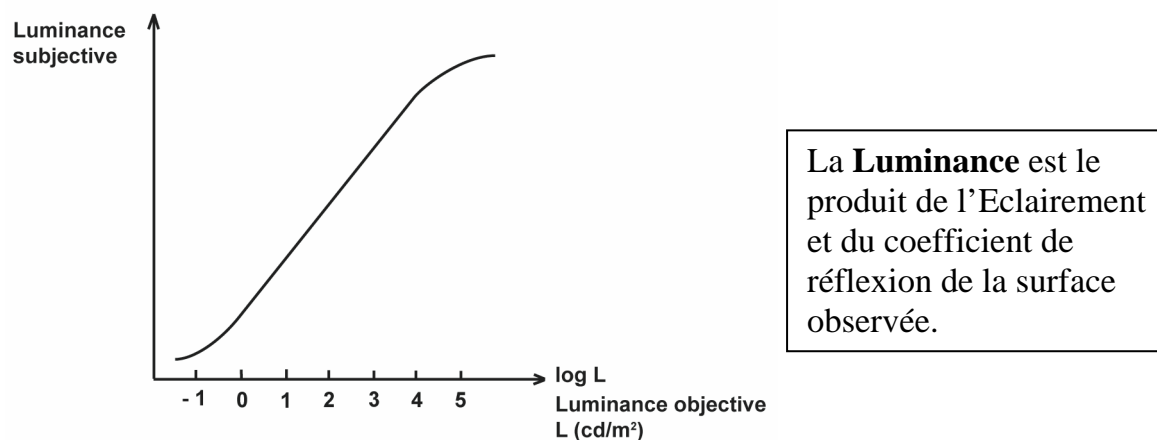
x	1	10	100	1000	10 000	100 000
Log x	0	1	2	3	4	5

L'œil interprète les informations lumineuses de manière quasi-logarithmique.

Ainsi, dans les basses lumières, l'œil perçoit une grande différence entre de faibles écarts de luminosité. Dans les hautes lumières, il est peu sensible à de grands écarts de luminosité.

La courbe d'adaptation de l'œil présente l'écart des luminances susceptibles d'être perçu par l'œil. Tout comme la courbe sensitométrique, elle fait appel à une échelle logarithmique.

Courbe d'adaptation de l'œil en vision diurne ²



La gamme des luminances que l'œil peut percevoir est très importante. Pour cela, l'œil change constamment son adaptation à la luminosité ambiante, par variation du diamètre de la pupille et de la sensibilité de la rétine.

C'est comme si l'œil possédait une « latitude d'exposition » extrêmement étendue. Sur le graphique, on relève une écart de 5 en log luminance, ce qui correspond à peu près à une latitude de 20 diaphragmes. Nous verrons que cette latitude surpasse tous les systèmes de captation d'image. Comme nous arrivons à percevoir des détails dans les zones les plus lumineuses et les ombres les plus denses, c'est l'impression que nous nous attendons à retrouver dans une image cinématographique.

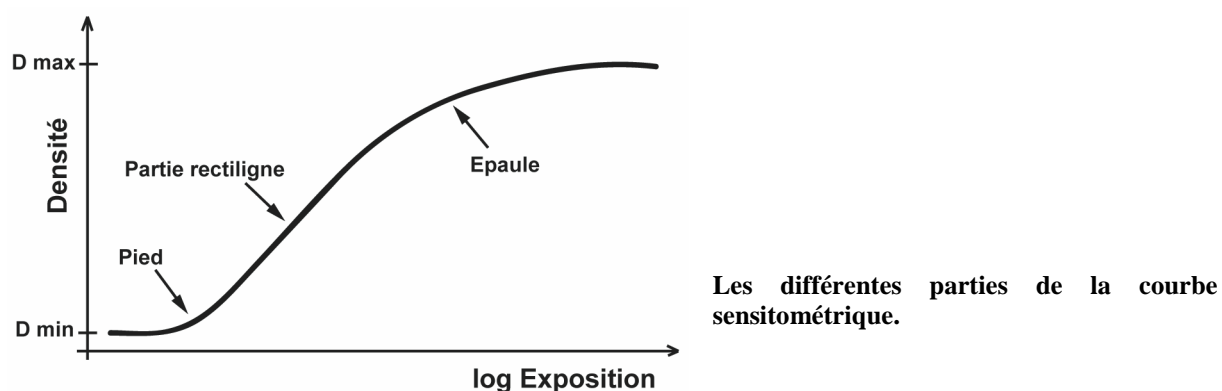
² Source : *Acquisition et Visualisation des Images*, André Marion, Editions Eyrolles, Paris, 1997, p. 488.

La représentation logarithmique utilisée par la courbe sensitométrique est donc très représentative de notre perception.

1.2.1.3. Caractéristiques de la courbe sensitométrique

On peut remarquer que la courbe sensitométrique d'une pellicule et la courbe d'adaptation de l'œil ont des similitudes de forme.

Examinons les différentes parties de la courbe sensitométrique qui donnent à la pellicule argentique son rendu d'image si particulier.



La courbe comprend une portion de droite appelée **partie rectiligne**. On a alors proportionnalité entre la densité et le log de l'exposition.

Le coefficient directeur de cette droite est appelé le **gamma**. Il donne le contraste de la partie rectiligne. Ce gamma a un rapport direct avec la latitude d'exposition.

Plus le gamma est faible, plus le contraste est doux et plus la latitude d'exposition est importante. Les pellicules négatives possèdent ainsi un gamma doux de l'ordre de 0,6. À l'inverse, une pellicule au contraste élevé aura une latitude d'exposition d'autant plus faible. C'est le cas des pellicules positives dont le gamma est compris entre 3,5 et 4.

L'**épaule de courbe** et le **pied de courbe** enregistrent respectivement les parties les plus claires et les plus sombres de l'image. Ce sont des zones de « compression » dans lesquelles le contraste décroît progressivement à mesure que l'on s'éloigne de la partie rectiligne. Elles font la qualité du rendu de la pellicule argentique en permettant de conserver des nuances dans les zones extrêmes de hautes et de basses lumières.

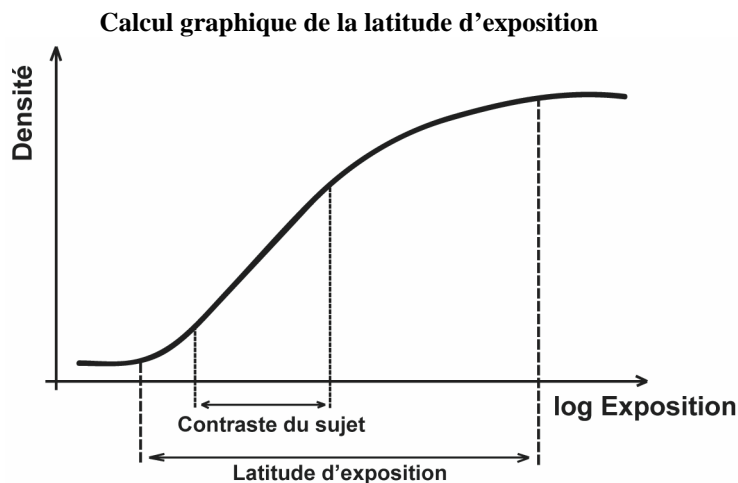
La **densité minimale** est la densité qu'on obtient lorsque la quantité de lumière est trop faible pour former une image latente. On est en dessous du seuil de sensibilité de la pellicule.

La **densité maximale** correspond à un niveau de saturation de la pellicule.

Ces différentes caractéristiques ont été optimisées pendant de nombreuses années par les fabricants pour produire un rendu d'image satisfaisant. Elles constituent une référence à l'heure où le numérique veut s'emparer des supports de captation.

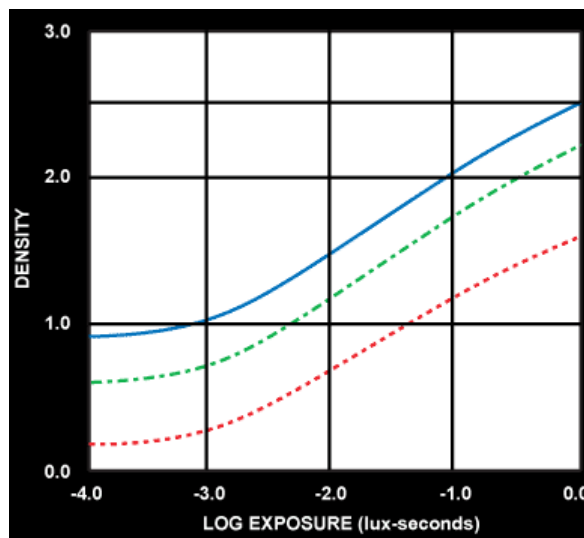
1.2.1.4. Lecture de la latitude d'exposition

Proposons une méthode pour lire la latitude d'exposition sur une courbe sensitométrique. On part du principe qu'il n'y a pas de méthode unique pour lire la latitude d'exposition d'une pellicule. On la détermine en fonction du rendu qu'on estime intéressant. Certains choisiront d'inclure le pied et l'épaule de courbe, comme nous l'avons fait sur le schéma. D'autres préféreront travailler uniquement sur la partie rectiligne. A chacun de définir la latitude d'exposition avec laquelle il souhaite travailler.



Sur le schéma, on observe une marge entre l'étendue des luminations du sujet et la latitude d'exposition. C'est de ce décalage que naît la latitude de pose. Plus le contraste du sujet augmente, plus la latitude de pose diminue.

Prenons un exemple numérique avec la courbe de la négative 500T 5218 de Kodak, l'une des plus utilisées actuellement. Voici la courbe diffusée par le fabricant.



**Courbe Sensitométrique de la négative 5218,
Site internet de Kodak**

On remarque que l'épaule de courbe ne figure pas entièrement sur le graphique, ce qui va limiter notre calcul.

Si on inclut le pied de courbe dans notre estimation de la latitude d'exposition, on obtient un écart en log d'environ 3,5.

Rappelons qu'un diaphragme correspond à un écart de 0,3 en log.

Un écart de 3,5 correspond donc à une latitude d'exposition d'approximativement $3.5 / 0.3 = 11,5$ diaphragmes.

Prenons alors l'exemple d'un sujet qui aurait 8 diaphragmes de contraste. On disposerait alors de 3 diaph 1/2 de latitude de pose.

Le chef opérateur pourra tirer parti de cette latitude de pose. Il peut choisir par exemple d'utiliser la particularité de rendu du pied de courbe, en sous-exposant son image. C'est ce type de travail qu'a fait Philippe Rousselot sur *La Reine Margot* de Patrice Chéreau (1994), ce qui lui permettait d'obtenir un contraste très doux dans les ombres.

Rappelons à présent que la latitude d'exposition d'une pellicule négative ne représente pas l'étendue des contrastes qui sera effectivement reproduit par la chaîne argentique. Elle sert avant tout à donner un confort de travail au chef opérateur, en lui permettant de positionner son image selon le rendu qu'il souhaite obtenir. Elle permet également de minimiser l'impact d'une erreur d'exposition.

L'écart d'exposition qui sera effectivement reproduit en projection s'appelle **la latitude de reproduction image**. Son étude va nous permettre d'expliquer les différences de rendus entre pellicules négatives et inversibles.

1.2.2. La latitude de reproduction image

L'outil que constitue le diagramme de Jones va nous permettre de comprendre ce que devient la latitude d'exposition négative au travers de la chaîne argentique. On simplifie ce diagramme en ne considérant que le tirage d'un film négatif sur une pellicule positive. Les contrastes des internégatifs et interpositifs étant égaux à 1, ils n'interfèrent pas sur la latitude de reproduction image.

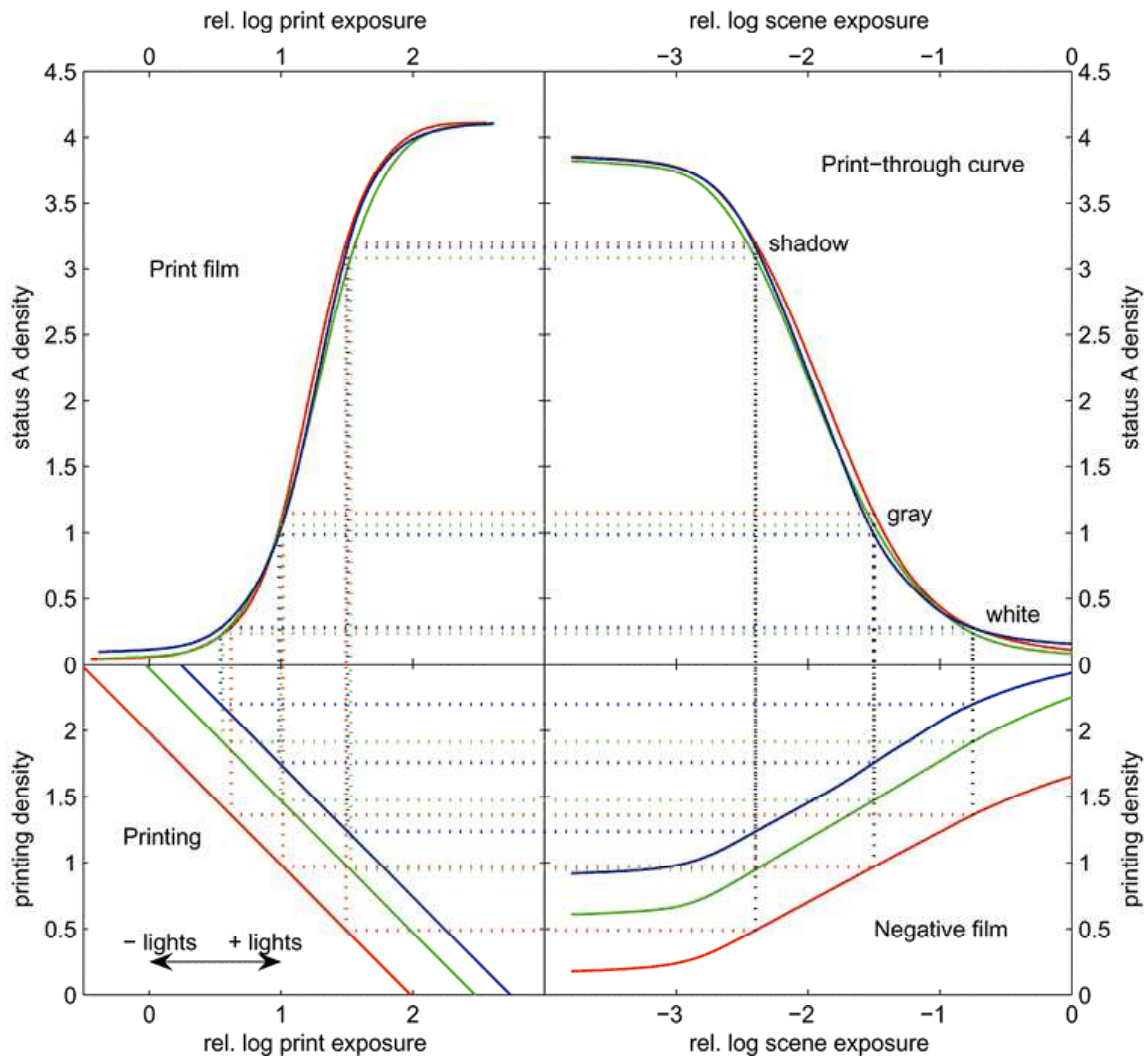


Diagramme de Jones réalisé par Douglas Walker, Site Internet de l'ASC³

Dans le cadran en bas à droite on place la courbe sensitométrique d'une pellicule négative. Par calcul graphique, on relève une latitude d'exposition d'au moins 3 log exposure, soit 10 diaphragmes.

Dans la case en haut à gauche figure la courbe sensitométrique de la pellicule positive sur laquelle on va tirer le négatif. On remarque que cette pellicule a une latitude d'exposition d'approximativement 2 log exposure, soit environ 6,5 diaphragmes.

³ Illustration de Douglas Walker, Site theasc.com
<http://www.theasc.com/magazine/april05/conundrum2/image9.html>

Dans le cadre en bas à gauche sont représentées des droites à 45° figurant les valeurs d'étalonnage.

Par construction graphique, on obtient dans la case en haut à droite la courbe du **sensito image** résultant du tirage. Son contraste d'environ 1,6 est le produit du contraste négatif et du contraste positif. Il a été défini pour assurer un bon confort de vision au spectateur dans les conditions de la projection cinématographique.

Calculons à présent la **latitude de reproduction image**, qui correspond à la latitude d'exposition équivalente du sensito image. Il faut tenir compte du fait que l'œil ne perçoit pratiquement plus de détail au-dessus d'une densité de 3.5.

Par estimation graphique, on trouve une latitude de reproduction image d'approximativement 2 log exposure, soit environ 7 diaphragmes.

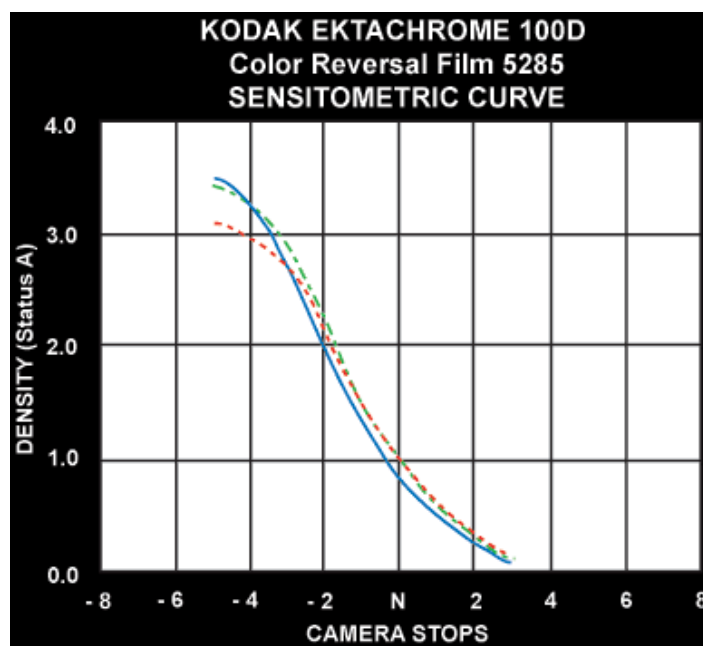
Cela signifie que parmi les 10 diaphragmes enregistrés par la pellicule négative, seuls 7 diaphragmes seront vraiment visibles en projection.

Quel est alors l'intérêt d'avoir une latitude d'exposition aussi étendue pour la pellicule négative ?

Pour répondre à cette interrogation, prenons l'exemple de la pellicule inversible.

1.2.3. Le cas de la pellicule inversible

La pellicule inversible était utilisée pour filmer les actualités télévisées avant l'arrivée de la vidéo. Elle avait l'avantage de fournir une image directement positive et réduisait les temps de post-production.



Courbe Sensitométrique de l'Ektachrome 100D fournie sur le site Internet de Kodak

La courbe de l'inversible ressemble à celle du sensito image du diagramme de Jones. On relève graphiquement une latitude d'exposition d'approximativement 6,5 diaphragmes.

Le contraste est proche de 2. Il permet à la pellicule inversible de pouvoir être projetée sans autre étape de post-production. La latitude d'exposition correspond ici à la latitude de reproduction image, puisqu'on se sert de la même pellicule pour capter et projeter.

Ce qui pourrait convenir en théorie à la prise de vue cinéma se révèle en pratique catastrophique. En effet, la moindre erreur d'exposition, ne serait-ce que d'un demi diaphragme, provoque des zones brûlées ou des noirs bouchés, comme l'évoque Ricardo Aranovich.

J'ai pu apprécier la particularité de ce rendu en tournant en tant que chef opératrice quelques courts métrages en inversible. Après quelques essais préliminaires, nous avons déterminé qu'une scène devait se dérouler soit entièrement au soleil, soit entièrement à l'ombre, pour éviter un rendu catastrophique. Tourner en pellicule inversible se fait donc au détriment de la liberté du cinéaste, puisque la faible latitude d'exposition détermine le champ d'action des personnages.



Photogramme issu du court métrage *Invisibleu* de Victor Saumont

Sur cette image tirée d'un court métrage tourné en super-8 kodachrome, on observe des zones totalement surexposées sur le cou et la main de la jeune fille, typiques du rendu inversible.

La vision récente de certains long-métrages tournés en numérique, comme *Deux Frères* ou *Saint Jacques la Mecque*, ressuscite des préoccupations qu'on avait oubliées depuis l'inversible. On observe qu'en éclairage naturel les passages de l'ombre à la lumière se mettent à poser problème.

Dans cette scène, les visages des acteurs deviennent des aplats blancs lorsqu'ils passent au soleil.

Photogramme extrait de *Saint Jacques... la Mecque* de Coline Serreau (2005), tourné en HD-Cam avec une Sony 750, Chef opérateur Jean-François Robin



Est-ce que la captation numérique est synonyme de peu de latitude d'exposition ? Il est vrai que la vidéo et l'inversible ont pour point commun d'obtenir une image directement affichable. Ne peut-on envisager un système négatif-positif en numérique ? Autant de questions auxquelles nous allons tenter de répondre par la suite. Mais dressons tout d'abord un bilan de la chaîne argentique.

1.2.4. L'efficacité de la chaîne argentique

Avec l'exemple de l'inversible, on voit qu'il est impossible d'utiliser la même pellicule pour capter l'image et la projeter si on veut conserver des détails dans les hautes et les basses lumières. C'est pourquoi la chaîne argentique utilise deux pellicules aux propriétés opposées.

On donne au négatif un faible contraste et une très grande latitude d'exposition, ce qui va permettre d'enregistrer des détails dans les blancs et les noirs, et de neutraliser les erreurs d'exposition.

Le positif a quant à lui pour rôle de fournir un contraste confortable à l'œil en projection.

Nous allons voir dans quelle mesure on peut appliquer les conclusions de ce raisonnement à la captation numérique. Est-ce parce qu'on a voulu faire de l'image vidéo une image directement affichable sur un moniteur qu'elle pose aujourd'hui des problèmes de rendu, surtout dans les hautes lumières ?

1.3. La latitude d'exposition en vidéo numérique

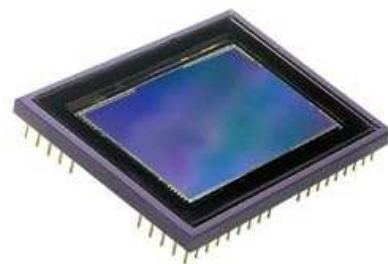
En apparence, la captation numérique obéit à une logique complètement différente de l'argentique. Nous allons déterminer les paramètres qui influent sur sa latitude d'exposition. Nous verrons si les leçons tirées de la chaîne argentique peuvent nous y aider.

Il nous faudra différencier les limites apportées par le capteur numérique en lui-même, et celles amenées par le traitement du signal à l'intérieur de la caméra. Comme nous avons étudié la courbe sensitométrique de la pellicule, nous allons étudier la courbe de réponse du capteur numérique.

1.3.1. La Latitude d'exposition du Capteur numérique

1.3.1.1. Une courbe de réponse linéaire.

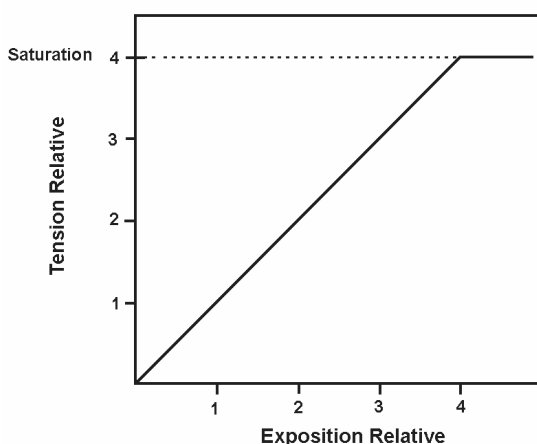
Le capteur numérique est un **composant électronique photosensible** qui transforme l'énergie lumineuse reçue en énergie électrique. Il est constitué d'une **matrice de cellules photosensibles**.



Chaque cellule comporte une cuvette qui fonctionne comme un « pluviomètre à lumière ». **Le nombre d'électrons accumulés dans ce puits est directement proportionnel au nombre de photons incidents.**

Nous insistons sur cette particularité du capteur numérique qui le différencie fondamentalement de la pellicule argentique : **sa linéarité**.

Voici la courbe de réponse simplifiée d'un capteur numérique.



Courbe de réponse d'un capteur numérique

Contrairement à la courbe sensitométrique qui se situe dans un repère log-log, on utilise ici un repère de coordonnées cartésien.

Analysons les caractéristiques de la réponse du capteur.

Une Réponse linéaire

La courbe de réponse est principalement constituée d'une droite, dont la pente vaut 1.

La tension obtenue en sortie de capteur est donc **proportionnelle** à l'exposition reçue, avec un **contraste de 1**.

Il s'agit de la courbe de réponse théorique. On assiste à de légers écarts à cette loi de linéarité aux limites d'éclairement. Lorsque l'éclairement est très faible ou bien très fort, la loi linéaire n'est plus tout à fait respectée.

Saturation

A partir d'une exposition limite, la réponse linéaire du capteur se change en une saturation totale, qui correspond à la saturation du puits de la cellule photosensible. Au voisinage de la saturation, la linéarité n'est plus tout à fait respectée.

On remarque l'absence d'épaule ou de pied de courbe. Contrairement à la pellicule argentique, le capteur numérique ne réalise pas naturellement de compression dans les basses et les hautes lumières.

Linéarité en basse lumière

L'absence de pied de courbe est un atout pour l'enregistrement des très faibles luminosités.

Les chefs opérateurs s'accordent à dire qu'ils obtiennent une meilleure sensibilité dans les basses lumières en prise de vue numérique. C'est pourquoi ils choisissent souvent la captation numérique pour les films qui se tournent de nuit.



Photogramme extrait du film *Collateral* de Michael Mann (2004), tourné en Viper et en Sony HDW F900
Chefs opérateurs Dion Beebe et Paul Cameron

Michael Mann, pour son film *Collateral*, a choisi de tourner en numérique pour capter les lumières de la ville de Los Angeles. Son chef opérateur Dion Beebe explique : *Le point fort de ce format est son incroyable sensibilité à la lumière. Nous pouvions filmer Los Angeles la nuit et voir les silhouettes des palmiers se détacher sur le ciel, c'était très impressionnant.*⁴

⁴ *The format's strong point is its incredible sensitivity to light. We were able to shoot Los Angeles at night and actually see silhouettes of palm trees against the night sky, which was very exciting.*
Propos recueillis par Jay Holbern, in *Hell on Wheels*, American Cinematographer, Août 2004.

Cette extrême sensibilité des capteurs numériques dans les basses lumières s'explique par trois facteurs : la linéarité de la courbe de réponse d'une part, mais également **l'absence de seuil de sensibilité** et un **rendement élevé**.

Un seuil de sensibilité négligeable

Nous avons vu qu'en argentique, il existe un seuil de sensibilité pour qu'une image latente se forme, qui exige une quantité minimale de lumière.

Ce seuil n'existe pratiquement pas en vidéo où même quelques photons sont pris en compte par les capteurs.

Un Rendement élevé

Du fait de leur linéarité, les capteurs numériques ont un rendement théorique de 99%. On obtient en pratique un rendement de **50%**, car tous les photons incidents n'atteignent pas la zone photosensible.

C'est un très bon rendement si on le compare à celui de la pellicule argentique, qui est de 5%. En argentique, il faut en effet 5 photons pour obtenir un atome d'argent, et au moins trois atomes d'argent pour rendre un grain d'halogénures d'argent développable.

Succès en astronomie

Ces caractéristiques expliquent le succès des capteurs numériques en imagerie astronomique. Autre argument de taille pour ceux qui veulent photographier les étoiles, ces capteurs ne présentent pas d'écart à la loi de réciprocité. Alors que le film argentique baisse en sensibilité de façon importante pour les temps de pose élevés, 100s de pose en numérique permettent d'obtenir 10 fois plus d'électrons que 10s.

A présent que nous avons analysé la réponse du capteur, nous allons nous intéresser aux paramètres qui limite sa latitude d'exposition. Nous utiliserons souvent le terme *dynamique*, très utilisé en numérique, synonyme de latitude d'exposition.

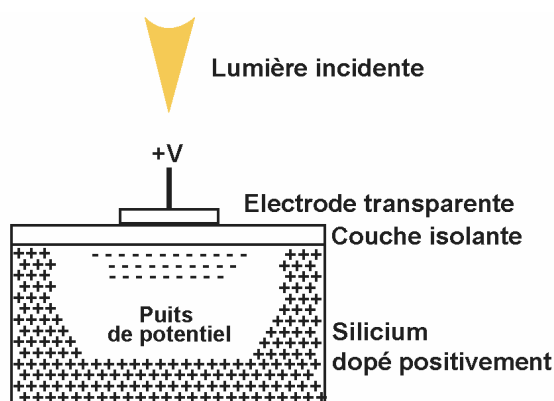
Commençons par étudier ce qui détermine le seuil de saturation.

1.3.1.2. La Capacité des puits

Le niveau de saturation du capteur dépend directement de la capacité des puits des cellules photosensibles.

Expliquons ce que l'on entend par *puits*. Pour cela, il nous faut revenir sur le principe des photosites qui composent la matrice du capteur.

Pour simplifier les choses, nous prenons l'exemple d'une cellule photosensible de type MOS (Metal Oxyde Semi-conducteur). Des cellules photosensibles plus performantes existent, telle la cellule HAD, mais leur principe général reste le même.



Principe d'une cellule MOS

Pour concevoir une cellule photosensible, on se sert des propriétés du **silicium**, qui est un matériau **semi-conducteur**. Sa conductivité électrique est intermédiaire entre les métaux et les isolants.

On utilise un substrat de silicium **dopé positivement**, c'est-à-dire que ses porteurs majoritaires sont de charge positive.

On applique au niveau de l'électrode transparente une **tension de polarisation +V**, qui repousse les porteurs de charges positives vers le fond de la cellule.

On voit alors apparaître autour de l'électrode un **puits de potentiel**, c'est-à-dire une zone caractérisée par un défaut en charges positives. **Plus la tension de polarisation est élevée, plus le puits de potentiel est profond.**

Lorsqu'un photon arrive dans la couche de silicium, il libère un électron immédiatement attiré par l'électrode. Le puits de potentiel se remplit d'électrons proportionnellement à la quantité de photons incidents.

Lorsque le puits est totalement rempli, il « déborde » vers un drain d'évacuation. On a alors atteint le niveau de saturation.

La quantité d'électrons accumulés durant l'exposition est donc limitée par la capacité du puits. Cette capacité dépend de deux facteurs :

- la taille de la cellule photosensible.

La taille d'un photosite est généralement comprise entre 7 et 15 microns.

A résolution égale, un grand capteur aura une meilleure dynamique qu'un petit capteur, car chacun de ses photosites sera plus grand. C'est une des raisons qui encourage l'utilisation de grands capteurs dans les caméras D-Cinéma.

- la tension de polarisation, qui détermine la profondeur du puits, et donc sa capacité.

A présent que nous avons déterminé ce qui limite la dynamique des capteurs dans les hautes lumières, étudions ce qui la limite dans les basses lumières.

1.3.1.3. Le bruit électronique

Le bruit électronique du capteur se traduit par un signal parasite qui brouille les basses lumières. Il est le facteur limitatif de la dynamique dans les basses intensités.

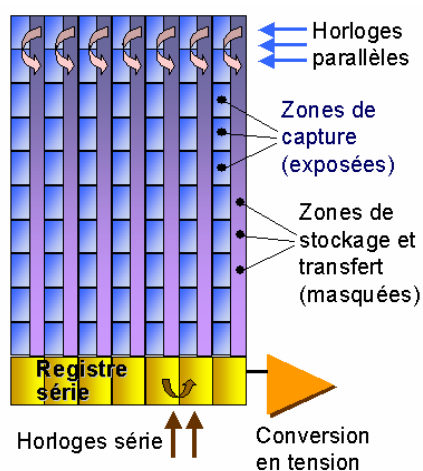
Pour rechercher plus précisément les causes de ce bruit, il nous faut différencier les deux familles de capteurs numériques : les CCD et les CMOS.

CCD contre CMOS

Inventés par les Laboratoires Bell dès 1969, les capteurs CCD atteignent les performances des tubes à la fin des années 80. Ils les remplacent alors dans les caméras vidéo. Les CMOS sont venus récemment mettre en doute leur suprématie. Expliquons ce qui différencie les technologies de ces capteurs.

CCD

Le sigle **CCD** désigne la façon dont les électrons sont évacués du capteur pour être transformés en signal. On a affaire à un « Dispositif à Transfert de Charges » (**C**harge **C**oupled **D**evice). Voici un schéma de ce mode de transfert, dans le cas d'un CCD à Transfert Interligne (IT) .



Suite à l'exposition, les charges électriques sont transférées de photosite en photosite grâce à des cycles d'horloge, qui commandent les tensions appliquées à chaque cellule. Une tension plus importante appliquée à la cellule voisine fait migrer les électrons vers elle. Et ainsi de suite.

Le capteur CCD est apprécié pour son **excellente sensibilité**. Il équipe aujourd'hui la plupart des caméras vidéo. La zone photosensible couvre de 35 à 70 % de la surface du capteur, selon le mode de transfert utilisé, IT (Interligne Transfert) ou FT (Frame Transfert).

Mode de transfert d'un CCD IT ⁵

Au rayon des inconvénients, le principe même du transfert de charges autorise une **lecture moins rapide** que celle de CMOS. Cela peut poser problème si on veut travailler à des cadences d'images élevées.

De plus, les tensions appliquées lors du transfert nécessitent beaucoup d'énergie, et les caméras équipées de CCD ont tendance à vider rapidement leurs batteries.

Enfin, s'il est relativement simple à fabriquer, le coût du CCD est très élevé, ce qui explique qu'il soit concurrencé aujourd'hui par le capteur CMOS.

⁵ « Schéma d'un CCD Interligne », in « Capteur photographique », in [Wikipedia.org], 2005

CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor)

A leurs débuts, les CMOS avaient la réputation d'offrir une moins bonne dynamique que les CCD. Ils font un retour en force sur le marché des appareils photo numériques depuis quelques années. Une seule des caméras D-Cinéma a choisi cette technologie : la D20 de chez Arri.

Le principe du CMOS est que **la conversion des charges en tension et leur amplification se fait au niveau de chaque pixel**, grâce à un amplificateur à transistors.

On peut dès lors bénéficier d'un accès aléatoire aux pixels, à la manière des cellules mémoire d'une RAM. La lecture est par conséquent plus rapide, ce qui permet en principe des cadences d'image plus élevées.

Comme il n'y a plus de transfert de charges, le capteur consomme moins d'énergie. L'avantage principal des CMOS pour les industriels est qu'ils sont moins coûteux à fabriquer que les CCD.

Leur désavantage est qu'ils sont généralement moins sensibles que les CCD.

Les différences de conception entre ces capteurs vont venir se répercuter sur leurs niveaux de bruit.

Les Sources de Bruit Electronique

Le bruit électronique d'un capteur a trois causes essentielles.

Le bruit photonique

Strictement proportionnel à l'exposition, il est la conséquence de la nature quantique de la lumière.

Le courant de noir

Même lorsque le capteur est exposé au noir, on mesure une intensité électrique appelée « courant de noir ». Elle est principalement due à l'agitation des électrons des matériaux constituant le capteur. **L'intensité du courant de noir est liée à la température ambiante et double tous les 8°**. Elle augmente avec l'usure du CCD.

Lorsque le capteur s'échauffe, on assiste à une montée de bruit dans les noirs. C'est un reproche que l'on fait parfois à la caméra HDW F900 de Sony.

La solution pour pallier ce défaut est un système de refroidissement du capteur, qui permet d'obtenir des performances constantes.

Ainsi, les dos numériques des chambres photographiques sont refroidis par ventilation et par radiateur à effet Peltier.

En photo astronomique, on va jusqu'à abaisser la température du capteur à celle de l'azote liquide (-196°), ce qui augmente la dynamique de façon spectaculaire.

Les capteurs CCD ont la réputation d'avoir un courant de noir plus faible que les CMOS.

Le bruit de structure

Il résulte des **différences de sensibilité entre les pixels** du capteur. Certains photosites trop sensibles génèrent des points lumineux dans les ombres. D'autres sont au contraire trop peu sensibles. On recense également des pixels morts complètement insensibles.

Pour corriger ce bruit de structure, on dresse une carte géographique des pixels défectueux et on les compense au moment de l'interpolation. On peut alors remplacer les pixels morts par une valeur moyenne calculée en fonction des pixels environnants.

Le bruit de structure des CMOS est 10 fois plus important que celui des CCD, à cause de la présence d'amplificateurs au niveau des pixels, qui présentent des disparités de fonctionnement.

Certains CMOS résolvent le problème grâce à un **double échantillonnage corrélé**. On prélève deux échantillons durant le cycle de lecture : une première fois lorsque le pixel est réinitialisé, et une deuxième fois en fin d'exposition. On en déduit l'amplitude du signal utile.

D'une façon générale, il semble que les CCD sont légèrement moins sensibles au bruit que les CMOS.

1.3.1.4. Calcul de la latitude d'exposition

On a vu que la latitude d'exposition d'un capteur numérique était limitée dans les hautes lumières par la capacité des puits des photosites, et dans les basses lumières par le niveau de bruit.

On peut caractériser cette dynamique en faisant le rapport de la capacité en électrons d'un pixel sur le niveau moyen de bruit.

D = Capacité du pixel/Bruit moyen

Prenons l'exemple d'un capteur ayant les caractéristiques suivantes :

Capacité de puits = 40 000 électrons

Bruit Moyen = 10 électrons

On obtient une dynamique de 4000 :1.

On peut l'exprimer aussi en nombre de diaphragmes. La quantité d'électrons étant proportionnelle à la lumière incidente, l'écart des luminosités reproduit est aussi de 4000 :1.

La latitude d'exposition de ce capteur est égale à $\log(4000) / 0,3 = 12$ diaphragmes

On utilise une deuxième grandeur pour caractériser la dynamique d'un capteur : le **Rapport Signal sur Bruit**, qui s'exprime en decibels.

$$\text{RSB (dB)} = 20 \log (\text{Capacité du pixel/Bruit}) = 20 \log D$$

Dans notre exemple :

$$\text{RSB} = 20 \log (40\,000/10) = 72\text{dB}$$

Du calcul de la dynamique, on va pouvoir estimer le nombre de bits nécessaires pour numériser le signal sans pertes de nuances.

Si on a une dynamique de 4000 :1, on a 4000 niveaux différents à distinguer.

Seule une numérisation sur 12 bits par couleur, avec ses $2^{12} = 4096$ niveaux disponibles, permettra de restituer la dynamique de 12 diaphragmes offerte par le capteur.

On peut également calculer le nombre de bits nécessaire à partir du Rapport signal/bruit, en se rappelant que la quantification nécessite environ 1 bit tous les 6 dB

Dans notre exemple :

$$\text{Nombre de bits} = \text{RSB}/6 = 72/6 = 12 \text{ bits}$$

Nous allons pouvoir ainsi passer à l'étude de la numérisation.

1.3.2. L'influence de la quantification

La tension issue du capteur est immédiatement numérisée grâce à un convertisseur analogique-numérique. Elle subit tout d'abord un **échantillonnage** : on découpe le signal analogique en tranches pour le mesurer à intervalle régulier. Vient ensuite l'étape de la **quantification**, qui consiste à attribuer une valeur numérique à chacun des échantillons prélevés.

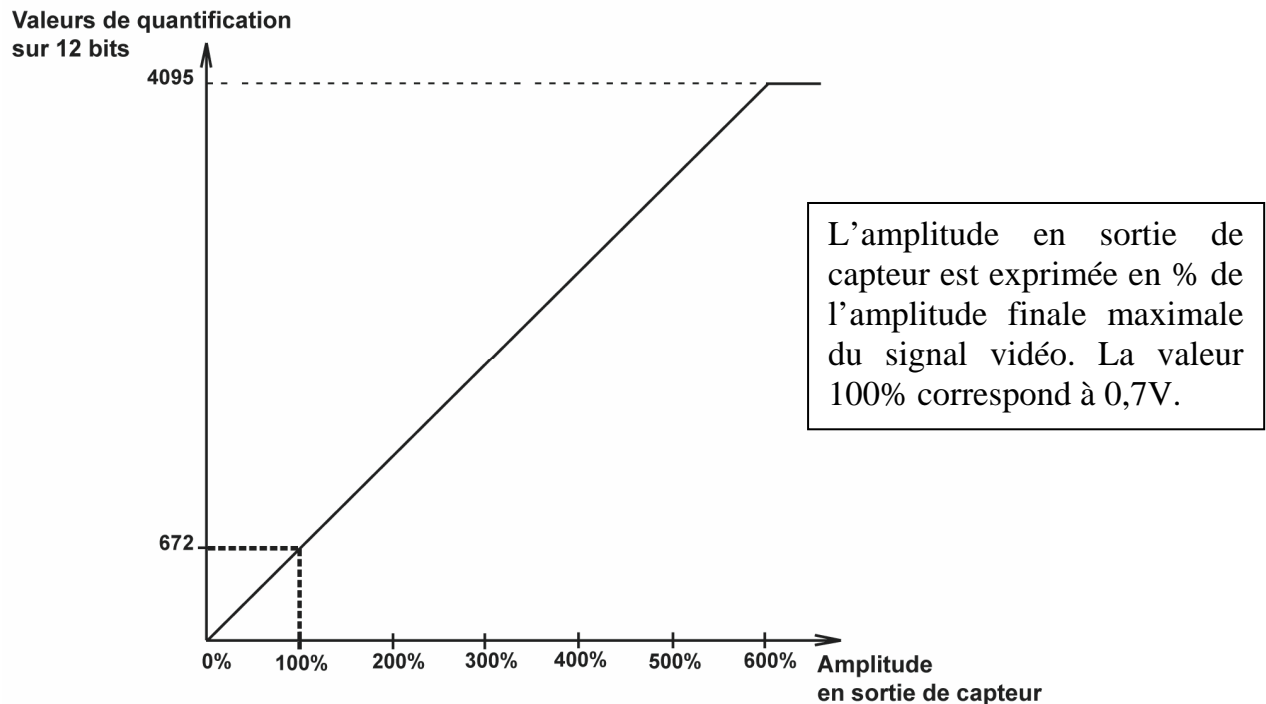
La **profondeur de codage** désigne le nombre de bits utilisés par cette quantification.

Comme nous l'avons calculé précédemment, il faut en théorie 12 bits par couleur pour préserver une dynamique de 12 diaphragmes.

En réalité, la plupart des caméras vidéos conçues pour la télévision ont un enregistrement sur 8 bits.

Les constructeurs choisissent toutefois d'effectuer la numérisation en sortie de capteur sur un nombre de bits plus élevé. En plus de préserver la dynamique, ce sur-échantillonnage limite les erreurs d'arrondis dans les calculs de traitement du signal. Par exemple, pour la Sony HDW F900, la numérisation en sortie de capteur se fait sur 12 bits, pour un enregistrement final en HD-Cam sur 8 bits.

Essayons de visualiser le principe d'une numérisation sur 12 bits.



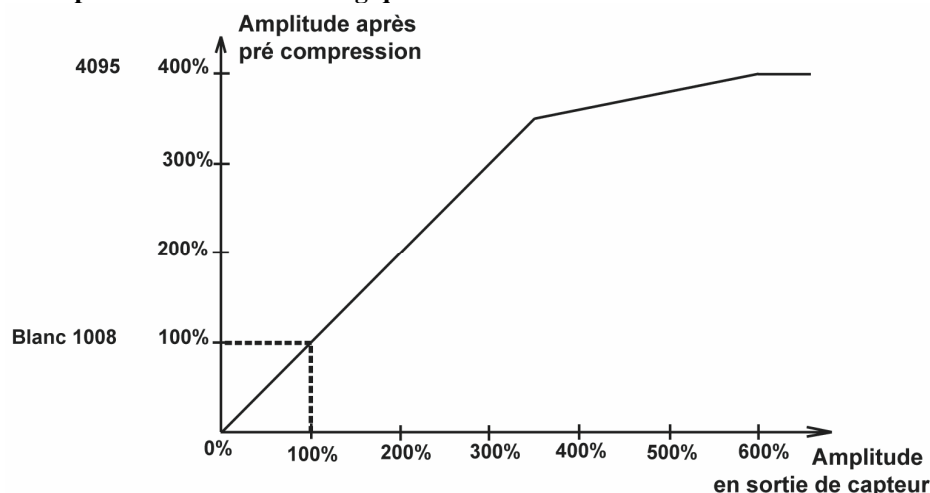
En observant ce schéma, on remarque que le fait de quantifier sur une échelle linéaire est assez aberrant. Le pas de quantification ne tient pas du tout compte de la perception logarithmique de l'œil. On consacre énormément d'échantillons aux très hautes lumières, alors que c'est le domaine où l'œil discerne le moins de nuances.

Dans cet exemple, il ne reste que 672 échantillons pour coder ce qu'on appelle la « plage nominale », comprise dans l'intervalle de 0 à 100%.

Nous verrons en effet par la suite que le signal vidéo est calibré pour fournir en sortie de caméra une image comprise dans l'amplitude de 0 à 700 mV. On considère en vidéo que tout ce qui est supérieur aux 100% de 700mV est blanc. Ces surblancs seront par la suite compressés pour rentrer dans la plage nominale ou purement et simplement éliminés.

Pour résoudre le dilemme amené par la quantification en linéaire, les industriels ont choisi d'effectuer avant la numérisation une précompression analogique des hautes lumières (*Pre-knee* en anglais). Sur le schéma ci-dessous, le pre-knee permet de réduire l'amplitude du signal de 600% à 400%, et d'effectuer la quantification de la plage nominale sur 1008 niveaux.

Principe de la correction analogique de Pre-knee



Comme on doit conserver un **pas de quantification acceptable** dans les basses lumières, on va devoir faire un compromis entre le nombre de bits utilisés, l'amplitude de la compression de pre-knee, et la dynamique du signal sur laquelle on choisit de travailler.

On peut par exemple disposer d'un capteur délivrant une amplitude de 1000%, mais choisir de n'en utiliser que 600%.

La profondeur de codage va déterminer la dynamique conservée lors de la numérisation.

Ainsi, on s'aperçoit que même si le capteur a une latitude d'exposition importante, on peut choisir lors de la quantification de n'en exploiter qu'une partie.

La latitude d'exposition de la caméra dépend fortement du nombre de bits alloués à la quantification. On ne retrouve pas forcément en sortie de convertisseur analogique-numérique toute la latitude d'exposition fournie par le capteur.

On mesure donc l'importance de la profondeur de codage sur laquelle s'effectue la quantification. Dans une caméra vidéo traditionnelle, le signal numérisé va ensuite subir toute une série de traitements dont certains ont de fortes répercussions sur la latitude d'exposition de la caméra.

1.3.3. Les Traitements du signal

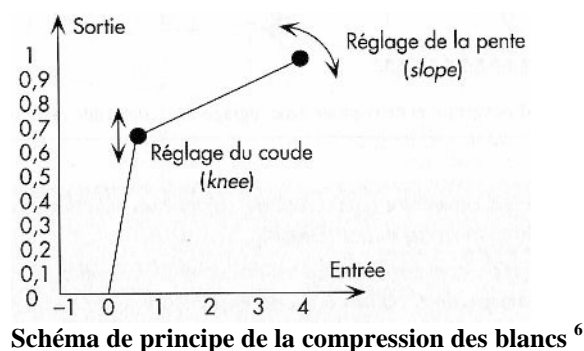
Parmi les traitements que subit le signal à l'intérieur de la caméra, nous étudions uniquement ceux qui peuvent avoir un impact sur la latitude d'exposition.

1.3.3.1. La compression des blancs

Comme nous l'avons vu précédemment, la conversion linéaire du capteur donne aux hautes lumières des amplitudes démesurées.

Malheureusement, en sortie de caméra, l'amplitude du signal vidéo est limitée à 700mV. Le circuit de **compression des blancs** a pour but de réduire l'amplitude des hautes lumières. Il fonctionne sur le même principe que la précompression analogique. Au delà d'un certain voltage, on comprime les valeurs de blancs.

Cette compression est un peu l'équivalent de l'épaule de courbe en argentique. Elle est indispensable si on veut conserver une bonne latitude d'exposition dans les hautes lumières.



La compression des blancs est paramétrable par l'utilisateur. Il peut régler le seuil à partir duquel s'effectue la compression (le KNEE), et la pente de la droite de compression (SLOPE). C'est comme un peu comme si l'utilisateur « fabriquait » lui-même son épaule de courbe.

1.3.3.2. La Correction de Gamma

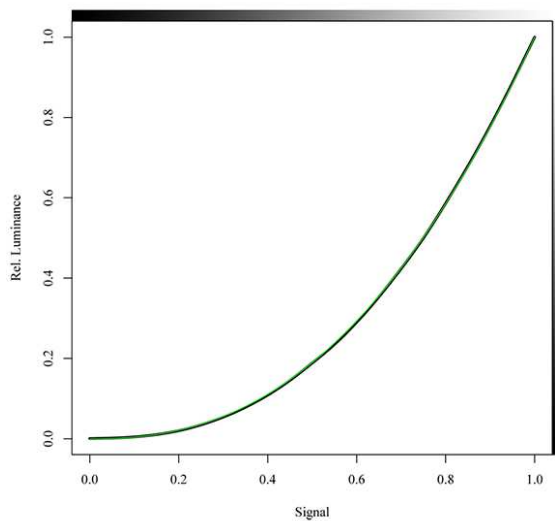
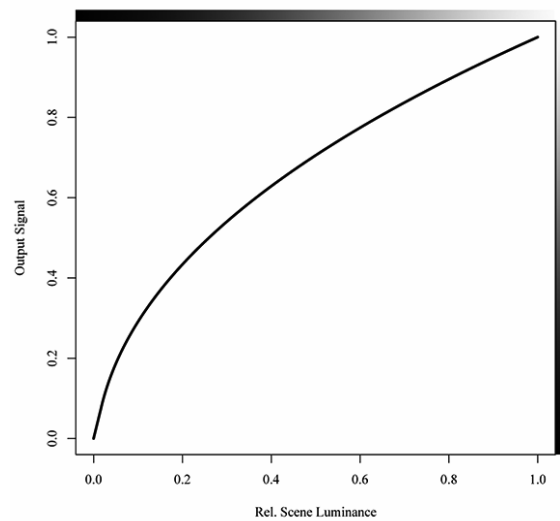
La réponse non linéaire du tube cathodique

Cette dernière correction du signal servait au départ uniquement à permettre un affichage correct de l'image vidéo sur une télévision.

En effet, la fonction de transfert d'un tube cathodique n'est pas linéaire.

Elle est de la forme $y = x^\gamma$ avec gamma $\gamma \approx 2,2$

⁶ Illustration de Philippe Bellaïche, in *Les Secrets de l'Image Vidéo*, Sixième Edition, Editions Eyrolles, Paris, 2006, p.176.

Fonction de transfert d'un tube cathodique ⁷Correction de gamma ⁸

Pour la compenser, on applique dans la caméra une **correction de gamma** de type $y = x^{0,45}$

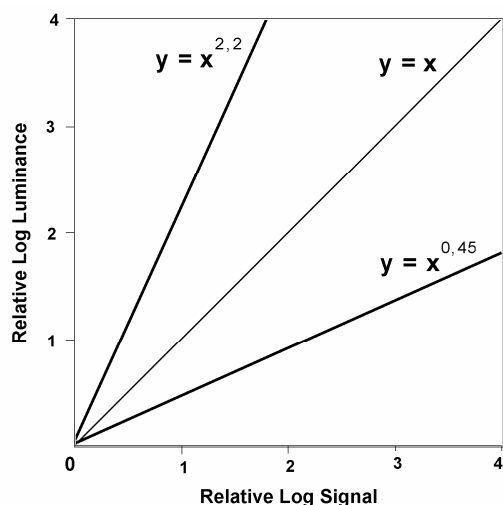
On retrouve alors la linéarité théorique du signal $y = x^{2,2 \times 0,45} = x$

L'Appellation « Gamma »

On peut se demander pourquoi on emploie ici le terme **gamma**, alors que nous avons vu qu'en argentique le gamma désignait la pente de la courbe sensitométrique ?

L'explication mathématique en est simple, si on trace la courbe de la fonction $y = x^{2,2}$ dans un repère log-log, on tombe sur une droite de pente 2,2.

En argentique comme en numérique, le terme gamma désigne la pente de la courbe de transfert dans un repère logarithmique.



Courbe de gamma dans un repère log-log

Le tube cathodique, avec son gamma de 2,2, amène un contraste élevé au signal, à la façon d'une pellicule positive.
Pour le compenser, on abaisse le contraste du signal en sortie de caméra à 0,45.
Pour calculer le contraste de la diffusion, il suffit de multiplier les deux gammas.

⁷ Harald Brendel, [hbrendel@arri.de], « Characteristic curve of CRT monitor as linear plot », in « Arri Companion to DI », Second Edition, in [arri.com], 2005.

⁸ Harald Brendel, [hbrendel@arri.de], « ITU-R BT.709 transfer curve », opus cité.

Dans la réalité, le contraste de l'image finale est légèrement supérieur à 1, car les moniteurs ont un gamma plus proche de 2,4 que de 2,2.

Comme en argentique, ceci permet d'assurer un confort de visionnage à l'œil et de contrer l'effet de flare amené par les conditions de diffusion.

De même, la correction de gamma apportée dans les caméras n'est pas exactement $y = x^{0,45}$. L'Union Internationale des Télécommunications (ITU) est l'institution des Nations Unies chargées d'établir les normes de la télévision. Dans sa norme ITU-R BT.709, elle recommande d'appliquer les formules suivantes pour la correction de gamma :

$$V_s = 1,099 \times V_e^{(0,45-0,099)}$$

sauf pour les luminances relatives inférieures à 0,018 :

$$V_s = 4,5 \times V_e$$

avec V_e le signal en entrée du circuit de correction de gamma,

V_s le signal de sortie

La deuxième formule qui concerne les basses lumières amènent un gain qui va exercer une sorte de compression des noirs.

Très vite, les utilisateurs de caméra vidéo vont comprendre que modifier la courbe de gamma va leur permettre d'agir sur le contraste de l'image.

Les constructeurs proposent aujourd'hui dans les menus de caméras de fins réglages qui permettent d'optimiser la courbe de gamma pour obtenir des rendus particulier.

On peut même agir séparément sur les parties de la courbe, ce qui permet de modifier le contraste séparément dans les basses lumières. L'utilisateur peut se « fabriquer » lui-même un pied de courbe.

Prenons en exemple certains réglages proposés par le menu PAINT de la Sony HDW F900.

Dans le sous-menu GAMMA :

En agissant sur le paramètre COARSE, on peut choisir une valeur de gamma comprise entre 0,35 et 0,90. C'est un peu comme si on choisissait une pellicule négative plus ou moins contrastée...

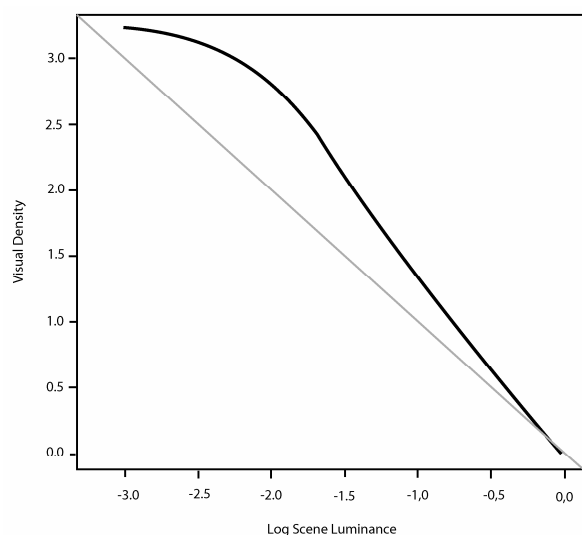
Dans le sous-menu BLACK GAMMA, on peut agir sur le gain dans les basses lumières, et agir sur la compression des noirs.

La correction de gamma, au départ fonctionnelle, est devenue un réglage artistique...

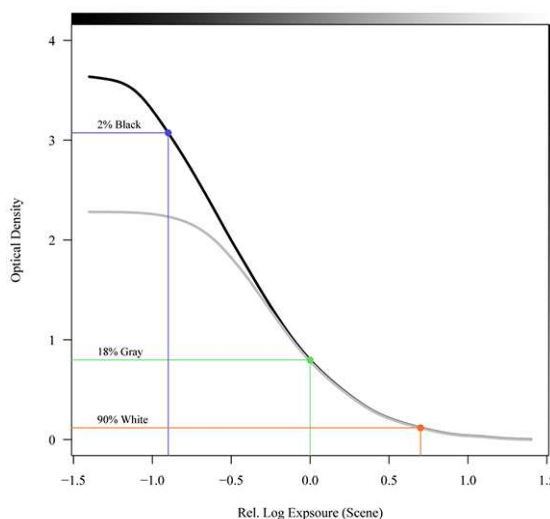
La compression des blancs tout comme la paramétrage de la courbe de gamma vont permettre à l'utilisateur de choisir dans une certaine mesure la latitude d'exposition sur laquelle il souhaite travailler. Mais nous allons voir qu'il ne bénéficie pas pour autant de latitude de pose...

1.3.4. Le « Sensito Image » en Vidéo

Pour comprendre la différence de rendu qui existe entre les chaînes numériques et argentique, étudions la courbe qui résume la chaîne vidéo : celle de la luminance de l'écran cathodique en fonction de la luminance du sujet filmé. On l'examine dans un repère log-log pour pouvoir la comparer à la courbe du sensito image argentique.



« Sensito Image » de la chaîne vidéo ⁹



Sensito Image de la chaîne argentique ¹⁰

Les deux courbes ont un contraste supérieur à 1, pour assurer un bon confort de visionnage.

On remarque que les deux systèmes apportent une compression dans les basses lumières. En vidéo, cette compression est amenée en partie par la réponse du tube cathodique dans les noirs, mais également par la correction de gamma appliquée selon la norme ITU-R BT.709.

La courbe de la chaîne vidéo se place dans le cas où aucune compression des blancs n'est réalisée dans la caméra. On voit alors que contrairement à la chaîne argentique, la chaîne vidéo n'amène pas naturellement de compression dans les hautes lumières. Cela peut expliquer en partie le rendu traditionnellement problématique des blancs en vidéo. Il faut donc impérativement se servir des circuits de correction des blancs si on veut un rendu acceptable des hautes lumières.

⁹ D'après Harald Brendel, [hbrendel@arri.de], « Broadcast system transfer curve », opus cité.

¹⁰ Harald Brendel, [hbrendel@arri.de], « Motion picture print through curve », opus cité.

1.3.5. Le Signal Vidéo : une Logique Inversible ?

Nous avons parcouru les différentes étapes de construction du signal vidéo à l'intérieur d'une caméra vidéo standard.

Force nous est de constater que cette méthode de captation numérique s'apparente au principe d'une pellicule inversible.

Dans les deux cas, on veut capter une image et la rendre immédiatement affichable.

Les deux systèmes ne laissent donc aucune place à une latitude de pose éventuelle.

On obtiendra en vidéo une latitude d'exposition de 7 ou 8 diaphragmes, guère plus qu'avec une pellicule inversible. Cette dynamique finale n'exploite pas forcément toutes les latitudes d'exposition fournies par le capteur.

C'est surtout la mise en forme du signal vidéo pour le préparer à l'affichage sur un moniteur qui limite fortement la latitude d'exposition du système.

Toutes les informations qui se situent au-dessus des 700mV du signal utile seront soit très fortement compressées, soit purement et simplement effacées par écrêtage. On n'a donc aucune possibilité de sur-exposition de l'image comme en argentique. La latitude de pose est presque inexistante. Les possibilités de l'étalonnage vont être extrêmement réduites. On n'a pas les avantages d'une latitude d'exposition négative, et la moindre erreur d'exposition est irrattrapable.

L'immense avantage de la vidéo sur l'inversible en terme d'exposition est qu'on dispose d'outils de visualisation: zebra dans le viseur de la caméra, moniteur, oscilloscope. On peut donc plus facilement calibrer l'exposition pour essayer de faire rentrer le contraste du sujet dans la latitude d'exposition de la caméra.

Ce qui peut s'avérer satisfaisant en télévision ne l'est pas en cinéma, où les chefs opérateurs exigent d'avoir du détail dans les blancs et les noirs.

Nous allons à présent examiner les solutions récentes proposées par les constructeurs pour le cinéma numérique.

Ces propositions semblent avoir pris pour exemple la chaîne argentique, et une nouvelle expression a vu le jour, celle de « négatif numérique ».

2. La Notion de « Négatif Numérique »

Au fur et à mesure que la captation numérique s'installait dans le champ du cinéma, les constructeurs se sont efforcés de répondre aux exigences des chefs opérateurs en terme de latitude d'exposition.

En 2001, *Vidocq*, le premier long-métrage français tourné en haute définition numérique, se sert d'une caméra héritière des caméras de télévision : la Sony HDW F900. Cette caméra est bientôt adoptée par le loueur de caméras films Panavision, qui la « panavise » en lui adaptant divers accessoires films.

En 2004, face à la demande des chefs opérateurs, les ingénieurs de Sony France mettent au point des courbes de gamma baptisées *hypergammas*, qui ont pour objectif d'étendre la latitude d'exposition de cette caméra. *Les Poupées Russes* de Cédric Klapisch sera le premier long-métrage à en bénéficier.

L'année 2004 marque un tournant important pour la captation numérique. Plusieurs constructeurs se mettent à sortir des caméras numériques dédiées au cinéma, qui revendiquent l'enregistrement d'un signal « pseudo-négatif » ne pouvant être affiché directement sur un moniteur.

En l'espace de quelques années on a abandonné l'idée d'une logique vidéo « inversible » imposée à la prise de vue cinéma. Les constructeurs comprennent qu'il faut capter un signal à la latitude d'exposition élevée pour conserver des possibilités d'étalonnage.

A travers ce chapitre, nous allons étudier les technologies proposées par les différents constructeurs pour fournir une latitude d'exposition adaptée à la prise de vue cinématographique.

2.1. Les courbes films des caméras vidéos

Nous allons étudier en premier lieu les caméras qui conservent les caractéristiques des caméras de télévision, tout en essayant de les optimiser pour la prise de vue cinéma.

2.1.1. La Sony HDW F900 et les « Hypergamma »

A son apparition en 2000, la caméra F900 rend possible la captation numérique en prise de vue cinématographique. Elle a depuis un nombre impressionnant de long-métrages à son actif. Prenons le temps d'étudier quelques-unes des caractéristiques de cette caméra pionnière.

2.1.1.1. Caractéristiques de la F900

En héritière des caméras de télévision, la F900 est équipée de 3 capteurs CCD 2/3" FIT utilisant la technologie Hyper HAD. L'inconvénient de ce type de capteur en application cinéma est que lorsque la caméra chauffe, les trois capteurs qui enregistrent respectivement les 3 couleurs RVB ont des niveaux de bruit inégaux, et des dominantes colorées peuvent apparaître dans les noirs. La balance des noirs doit être effectué régulièrement sur le tournage.



La F900R déguisée en caméra film...

De plus, la petite taille des capteurs 2/3" entraîne une profondeur de champ plus importante qu'en 35mm, ce qui donne à l'image un côté plat un peu « vidéo ».

Sa sensibilité est annoncée à 320 ISO, mais elle dépend évidemment des courbes de gamma appliquées.

La numérisation en sortie de capteur se fait sur 12 bits, ce qui pourrait donner une dynamique intéressante à la caméra, mais l'enregistrement se fait sur bande magnétique HD-Cam sur 8bits.

Son capteur possède une résolution de 1920x1080, qui correspond à la résolution standard de la haute définition numérique. Mais là encore, l'enregistrement en HD-Cam vient rogner sur la résolution latérale, qui tombe à 1440 points par ligne pour la luminance, et 520 pour la chrominance. L'échantillonnage se fait en effet en composantes, et non pas en RVB .

A noter également que l'enregistrement en HD-Cam amène une compression de 7 :1.

Les petits plus qui la font apprécier des cinéastes est qu'elle est relativement légère, et possède un mode d'enregistrement en 24 images par seconde.

En 2006 est sortie une version allégée en poids : la F900R (5,4 kg sans optique).

La F900 apparaît comme une caméra hybride située à mi-chemin entre les exigences de la télévision et du cinéma. Son taux de compression et son mode d'échantillonnage en composantes n'en fait certainement pas la caméra idéale pour les incrustations.

En 2004, Sony a sorti une version HDC F950 qui présente des caractéristiques plus adaptées à la prise de vue cinématographique. Elle enregistre en mode RVB 4 :4 :4 et en 10 bits sur magnétoscope HD-Cam SR séparé SRW-1, avec une compression de 4,2 :1. Cette version est plus adaptée aux contraintes des effets spéciaux, mais perd en légèreté de tournage puisqu'elle nécessite un enregistreur séparé. L'enregistrement sur 10 bits permettrait de gagner un diaphragme de latitude d'exposition.

Si en 2002 Georges Lucas décide de tourner Star Wars, Episode II en F900, il opte ensuite pour la F950 sur Star Wars Episode III.

2.1.1.2. Les Courbes « Hypergamma »

Devant l'engouement des cinéastes pour la F900, des ingénieurs de Sony France, Fabien Pisano et Christian Mourier, mettent en point en 2004 des courbes dites « hypergamma ». Ces courbes s'intègrent en option dans la caméra, et permettent d'étendre sa latitude d'exposition.

Ce qu'ils désignent sous le terme générique « courbe hypergamma » regroupe en fait toute une série de réglages.

Pour pouvoir intégrer les courbes hypergamma, chaque caméra F900 doit retourner à l'usine où l'on modifie les tensions de substrat du capteur. On va ainsi augmenter les tensions de polarisation des puits des cellules photosensibles. Cela améliore la profondeur de ces puits, qui auront une capacité supérieure en électrons. On agit ici directement sur les propriétés du capteur pour augmenter sa dynamique.

Du fait de cette modification, les caméras adaptées aux hypergamma doivent subir un contrôle chez Sony France tous les 6 mois pour vérifier qu'il n'y a pas de dérive du capteur. C'est ce qu'on appelle le « Prime Check HD » chez les loueurs de caméra.

La fonction HyperGamma agit sur plusieurs réglages à la fois :

le Pre-knee (Précompression analogique des blancs)

la Compression des blancs (KNEE POINT et SLOPE)

le WHITE CLIP (Réglage de la valeur à partir de laquelle on écrête le signal)

le Master Gamma (Réglage fin de la valeur du Gamma)

le Black Gamma (Réglage du coefficient par lequel on multiplie les basses lumières dans la correction de gamma)

C'est la courbe de transfert ainsi obtenue qui est appelée « courbe Hypergamma »

L'intérêt de cette courbe de transfert est qu'elle réalise une compression des blancs beaucoup moins « grossière » que si on agissait uniquement sur le réglage de KNEE. La compression classique des blancs propose un seul point d'inflexion de la courbe, au niveau du KNEE POINT, avec ensuite une pente de compression unique pour toutes les valeurs de blancs. Ce système de compression linéaire n'est pas vraiment fidèle à notre perception logarithmique de la lumière.

En agissant sur différents circuits de la caméra, les ingénieurs de Sony France donnent à la courbe de transfert toute une série de points d'inflexion. Ils parviennent ainsi à se rapprocher de la forme de l'épaule de courbe d'une pellicule argentique.

Lorsque l'on choisit une courbe hypergamma dans le menu de la caméra, le réglage de KNEE est automatiquement désactivé. L'utilisateur ne peut plus agir manuellement sur la compression des blancs, mais le constructeur lui laisse le choix entre plusieurs courbes hypergamma, qui ont des rendus plus ou moins contrastés.

Pour activer une courbe hypergamma, l'utilisateur doit se rendre dans le menu PAINT, puis dans le sous-menu GAMMA. La catégorie USER lui donne le choix entre 5 courbes :

GAMMA USER 1 - ITU 709 : Ce premier gamma utilisateur n'est pas une courbe Hypergamma. Il s'agit de la courbe de Gamma HDTV Standard telle que l'avons définie dans notre première partie.

GAMMA USER 2 - H 105 : HyperGamma qui conserve un contraste assez élevé.

GAMMA USER 3 - H 110 : HyperGamma « intermédiaire »

GAMMA USER 4 - H 120 : HyperGamma intermédiaire assez doux.

GAMMA USER 5 - H 140 : HyperGamma « extrême »

Plus le chiffre qui les désigne est élevé, et moins les courbes HyperGamma donnent un rendu d'image contrasté. La courbe H 140 est la plus douce, celle qui offre le plus de latitude d'exposition, et par conséquent le moins de sensibilité.

Les Poupées Russes de Cédric Klapisch est l'un des premiers longs-métrages à avoir utilisé les HyperGamma. Le chef opérateur Dominique Colin a utilisé les courbes H110 et H120.



Les Poupées Russes de Cédric Klapisch (2005), tourné en Sony F900, Chef opérateur Dominique Colin.

Hypergamma de la F900R

Sur la nouvelle version F900R, des courbes HyperGamma ont été intégrées en standard lors de la fabrication des caméras au Japon.

Les courbes appliquées ne sont pas exactement les mêmes sur la F900, car les tensions de substrat du capteur n'ont pas été modifiées. Le fabricant japonais n'a pas voulu se placer aux limites physique du capteur, pour éviter d'avoir à imposer un contrôle de ses caméras tous les 6 mois.

Voici comment Sony présente les 4 courbes hypergamma de la 900R :

HG1 : Le signal est écrêté à 700mV et la courbe est calibrée pour une utilisation de la caméra à -3dB.

HG2 : Signal écrêté à 700mV et courbe calibrée pour une utilisation de la caméra à 0dB.

HG3 : Le Signal est écrêté à 109%, c'est à dire à 750mV. La courbe est calibrée pour une utilisation à -3 dB

HG4 : Signal écrêté à 750mV et courbe calibrée pour une utilisation de la caméra à 0dB.

On découvre ici deux des techniques mises au point par les constructeurs pour étendre la dynamique de leurs caméras.

La première consiste à augmenter l'amplitude finale du signal à 750mV, pour enregistrer plus d'amplitude dans les blancs.

La deuxième permet d'utiliser la caméra en mode -3dB. Il faut en effet savoir que les constructeurs ajoutent généralement par défaut un peu de gain au signal élaboré dans la caméra pour proposer une meilleure sensibilité. En choisissant un gain de -3dB, on supprime le gain appliqué au signal, et on augmente le rapport signal sur bruit et la dynamique. On perd bien sûr 1/2 diaphragme en sensibilité.

La courbe hypergamma de la 900R qui offre en théorie le plus de latitude d'exposition est donc la HG3.

Utiliser une courbe hypergamma signifiera toujours perdre un peu en sensibilité, puisque qu'on abaisse le contraste de l'image.

Les courbes HyperGamma sont une étape importante dans la remise en question de la captation vidéo. On admet que l'enregistrement d'un signal vidéo directement affichable sur un moniteur n'est pas l'idéal pour conserver des détails dans les hautes et les basses lumières.

Ces courbes produisent une image au contraste adouci, qui n'est plus le contraste final de l'image. L'image qu'on enregistre doit passer par un étalonnage avant de trouver un contraste adapté à la diffusion.

Cette remise en question de la logique vidéo, dans le cas des HyperGamma, est encore assez timide. Les ingénieurs de Sony France assurent qu'on peut continuer à visualiser l'image directement sur un moniteur lors du tournage. Mais conseillent d'augmenter le contraste du moniteur pour se donner une idée du contraste final...

Le processus de remise en question du système « inversible » de la vidéo est en tout cas engagé. On admet qu'il faut enregistrer un signal intermédiaire en captation, qui a besoin d'être finalisé lors de l'étalonnage.

2.1.1.3. Paroles de Cinéastes sur la F900

Deux frères de Jean-Jacques Annaud (2004)

Tourné en 2003, le film *Deux frères* n'a pas pu bénéficier de l'utilisation des courbes HyperGamma. Mais l'ingénieur de la vision du film, Olivier Garcia, a préparé la caméra en agissant sur les mêmes paramètres que les inventeurs des HyperGamma : *Notre travail avec Jean-Marie Dreujou s'est réparti en deux parties : d'abord une intervention sur les capteurs CCD directement, en démontant la caméra et en modifiant leur gain, leur substrat et pre knee et d'autres paramètres... (...) Ensuite, une intervention sur les menus pour construire une courbe de réponse idéale.*¹¹

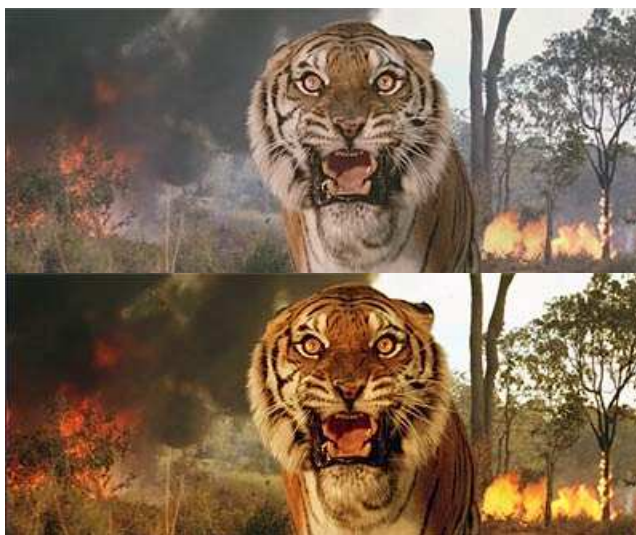


Malgré toutes ces précautions, le contraste très élevé de la jungle semble dépasser la latitude d'exposition de la caméra. Sur certains plans du film, les hautes lumières écrêtées ont perdu toute matière.

Sept semaines d'étalonnage à Eclair avec les étalonneurs Yvan Lucas et Bruno Patin n'y feront rien. Tourner en lumière naturelle, avec des écarts de luminosités si extrêmes, aurait sans doute nécessité une caméra disposant d'une latitude d'exposition d'une autre envergure...

La même image avant et après étalonnage¹²

On remarque sur la première image le rendu un peu doux de la courbe appliquée au tournage, qui a pour effet de décoller les noirs et de griser les blancs. Après étalonnage, l'image a retrouvé un contraste agréable à l'œil.



¹¹ François REUMONT, *Opérateur de la vision, un métier d'avenir*, Interview d'Olivier Garcia, Technicien du Film n° 543, Avril 2004, p. 26.

¹² Photogrammes tirés des proxies du Lustre, film *Deux frères*, Studios Universal et Eclair Laboratoires, in Benjamin Bergery, *Reflections : Two Brothers*, in [www.theasc.com], site de l'American Cinematographer, septembre 2004.

Les Ames Grises d'Yves Angelo (2005)

Jérôme Almeras, le chef opérateur du film, confirme que tourner au soleil avec la F900 est plutôt contre-indiqué : *La chance que l'on a eue, c'est que ce film a été tourné en hiver. Si ce film s'était passé au printemps, on aurait eu de gros soucis. Pour les séquences un peu ensoleillées du film, par*



*exemple quand Marina Hands est assise au bord du canal, je me suis arraché les cheveux. Jean-Pierre Marielle était en haut de d'escalier et il y avait un contre-jour naturel du soleil qui arrivait sur lui, et là, ça a été un peu dur, j'étais un peu en limite d'écrtage du signal.*¹³

Pour Yves Angelo, réalisateur du film et chef opérateur de plusieurs films en HD, l'avantage de la F900 est plutôt à rechercher du côté de sa latitude d'exposition dans les basses lumières : *En terme de sensibilité pure, c'est à peu près du 320 ISO, sauf que au pied de courbe, ce n'est pas 3 diaphragmes, mais 6 diaphragmes, donc tu vas très loin.*¹⁴

Conformément à la conception des caméras HD, la F900 a donc une latitude d'exposition intéressante dans les ombres, mais pas du tout dans les hautes lumières.

Elle reste avant tout l'héritière des caméras vidéo de télévision, dont le signal enregistré doit pouvoir être visualisé directement sur un moniteur.

Même si les ingénieurs de Sony France ont compris que cette conception devait être remise en question pour la prise de vue cinéma, la latitude d'exposition de la F900 n'est pas suffisante dans toutes les situations, surtout en lumière naturelle. Il faudra attendre pour cela des caméras conçues dès le départ pour le cinéma.

Parlons à présent de la concurrente directe de la F900 : la Varicam du constructeur Panasonic.

¹³ Benjamin B. « Entretien *Les Ames Grises* » In « Lumières n°2 », Edition AFC, p. 44.

¹⁴ Benjamin B., opus cité, p. 34.

2.1.2. La Varicam et le Mode « Film Rec »

La Varicam du constructeur Panasonic est elle aussi une caméra héritière de la tradition du reportage télévisé. Nous allons voir quels efforts ce constructeur a fait pour séduire les chefs opérateurs de cinéma.

2.1.2.1. Caractéristiques de la Varicam

La Varicam est équipée d'un capteur Tri-CCD 2/3'' IT. Ce capteur est équipé d'un système de refroidissement par effet Peltier, qui évite d'avoir des montées de bruit dans les noirs lorsque la caméra chauffe.

Il a une définition de 1280 x 720, qui est moindre que celle de la Sony F900. Cela lui permet d'avoir une dynamique potentielle plus élevée, puisque chacun de ses photosites est doté d'une plus grande surface. Sa sensibilité est par conséquent plus élevée, annoncée à 640. Le constructeur donne à l'utilisateur la possibilité d'augmenter son rapport signal sur bruit, et par conséquent sa dynamique, en réglant le gain sur - 6dB.



Depuis la Varicam version 2 sortie en 2005, la quantification en sortie de capteur se fait sur 12 bits, comme pour la F900.

Toutes ces caractéristiques sont revues à la baisse au moment de l'enregistrement au format DVC Pro HD. L'échantillonnage passe alors à 8 bits en composantes 4 :2 :2, la résolution latérale passant à 816 points par ligne pour la luminance, et 408 pour la chrominance. La compression DV se fait avec un rapport de 6,7 :1.

Si Panasonic a fait le choix d'une définition moindre que celle de la F900, c'est pour accorder à sa caméra une caractéristique digne des caméras films : la possibilité de faire de la vitesse variable de 4 à 60 images (d'où le nom « Varicam »).

Pour cela, le magnétoscope de la caméra enregistre en permanence à 60i/s.

L'obturateur électronique quant à lui prend des valeurs de 3° à 350° (exprimées ici en degrés pour pouvoir les comparer à celle d'un obturateur mécanique).

2.1.2.2. Le Mode « Film Rec »

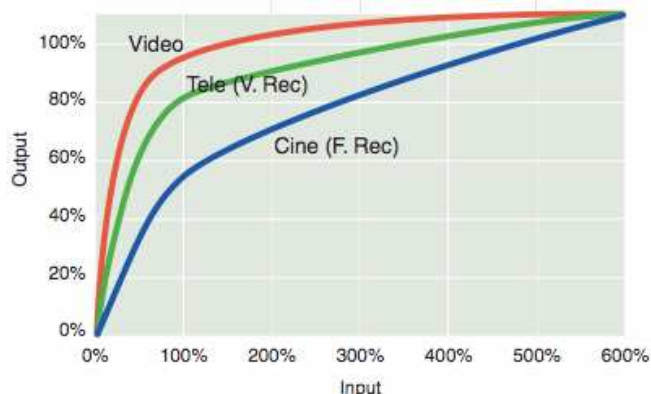
Comme Sony, Panasonic propose des courbes de gammas adoucies pour la prise de vue cinéma. L'utilisateur a le choix entre deux sortes de « cine gamma » :

- **Un gamma « Film Rec »**, très doux. Selon le fabricant, ce réglage de gamma a été établi en vue d'un retour sur film par l'intermédiaire d'un imageur Arrilaser. La sensibilité de la caméra tombe alors à environ à 320. Régler la caméra sur ce gamma inhibe la fonction KNEE.

On a par contre accès à deux options de menus supplémentaires :

Le **BLACK STRETCH LEVEL**, qui agit sur la compression des noirs, réglable entre 0 et 30.

un intéressant réglage de **DYNAMIC LEVEL**, réglable entre 200 et 500%, qui nous autorise à choisir sur quelle dynamique on travaille en sortie de capteur.



Un Gamma « Vidéo Rec », au contraste intermédiaire. Le fabricant conseille de l'utiliser pour les productions télévisées.

En pratique, on a donc le choix entre deux contrastes pour l'enregistrement des images.

Contrairement à Sony, Panasonic admet que l'image peu contrastée obtenue est difficilement affichable telle quelle sur un moniteur. Il propose un boîtier AJ-GBX27 contenant des LUT d'affichage pour visualiser l'image sur un moniteur durant le tournage.



Avec cet outil de prévisualisation, on peut dire que la nouvelle chaîne de captation numérique a trouvé ses grands principes :

Lors de la captation, on enregistre une image intermédiaire faiblement contrastée destinée à un étalonnage, sorte de « négatif numérique ».

Sur le tournage, ne pouvant pas afficher directement cette image sur un moniteur, on se sert de LUT d'affichage.

Le contraste final de l'image est obtenu lors de l'étalonnage, ce qui permet de conserver des détails dans les noirs et les blancs.

Dans la réalité, le boîtier d'affichage proposé par Panasonic n'est pas forcément utilisé par tous les chefs opérateurs, car certains s'habituent à travailler avec une image bas contraste. Mais ce principe est repris pour des caméras plus spécifiquement dédiées au cinéma.

2.1.2.3. Paroles de Cinéastes sur la Varicam



Crustacés et Coquillages de Olivier Ducastel et Jacques Martineau (2005), Tourné en Varicam, Chef opérateur Mathieu Poirot-Delpech

Malgré la courbe « Film Rec » utilisée, l'étalonnage n'est pas forcément facile sur des images issues de la Varicam, le chef opérateur Mathieu Poirot Delpech constate :

*Le signal HD est assez pauvre. Dès que l'on tire un peu dessus, l'image devient très artificielle. On découvre la faiblesse d'échantillonnage, en particulier pour les teintes chair.*¹⁵

Il fait également un bilan mitigé de ce type de caméra sur le plan pratique :

*Ces caméras sont réellement des caméras de télévision déguisées (mal) en caméras de cinéma. On met rapidement hors d'état de nuire tous les menus. On essaye de faire, le plus discrètement possible, les bascules de point sur le zoom d'origine qui "pompe" énormément. On utilise 5 mm de course sur la bague des focales du zoom. On cadre avec une visée noir et blanc dans laquelle on ne découvre les micros que lorsqu'ils sont bien dans cadre. On met la caméra sur l'épaule, mais tout le poids reste au bout des bras. Bref, on regrette les bonnes vieilles caméras film.*¹⁶

Intermédiaires entre les exigences du reportage télévisé et ceux du cinéma, la Sony F900 et la Varicam sont vite limitées lorsqu'on essaie de les utiliser en cinéma.

En 2004, plusieurs fabricants de caméra sortent des caméras spécifiquement dédiées au cinéma, qui proposent de nouvelles solutions pour se rapprocher de la latitude d'exposition de la pellicule négative.

¹⁵ Matthieu POIROT-DELPECH, « Crustacés et Coquillages », Lettre de l'AFC n°141, mars 2005.

¹⁶ Matthieu POIROT-DELPECH, opus cité.

2.2. L'arrivée des Caméras D-Cinéma

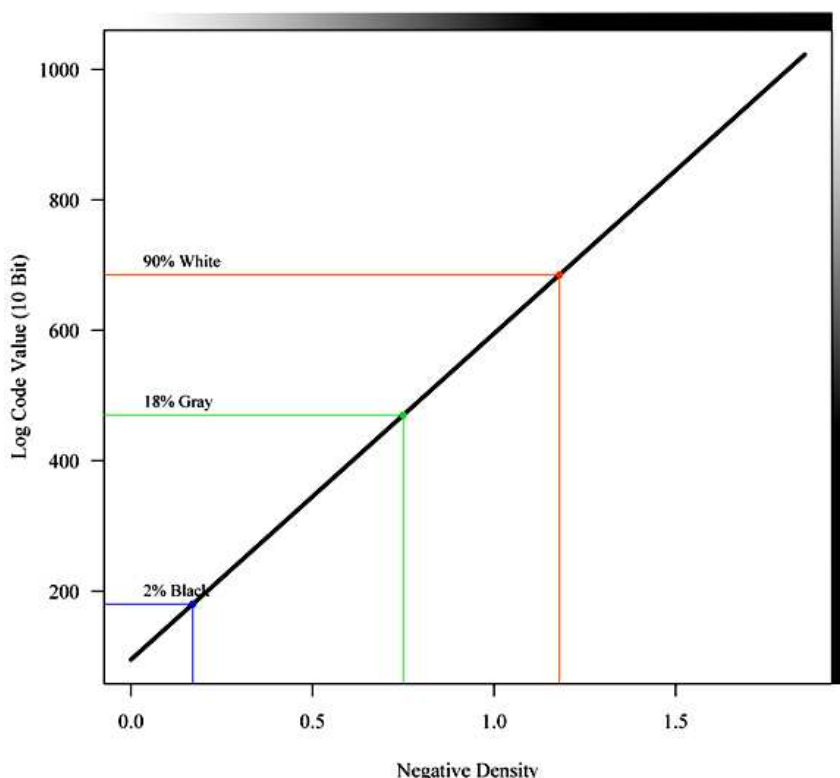
Les constructeurs des caméras « D-Cinéma » ont eu à concilier deux contraintes : gagner en latitude d'exposition tout en conservant des débits d'enregistrement raisonnables. Pour cela, ils se sont très fortement inspirés des formats qui étaient utilisés depuis une dizaine d'années en post-production numérique. Examinons l'intérêt de ces formats.

2.2.1. Le Format Cinéon

Le format « Cineon » est un format de post-production inventé par Kodak en 1992 pour stocker les données issues du scan des négatifs.

Comme les caméras numériques, les scanners sont équipées de capteurs, CCD ou CMOS, qui réagissent de façon linéaire à la lumière.

Kodak a voulu appliquer le principe de la captation argentique au mode de stockage des images scannées. Il propose un format qui encode les informations non plus de façon linéaire, mais logarithmique, pour être fidèle à la façon dont la pellicule et notre œil réagissent à la lumière.

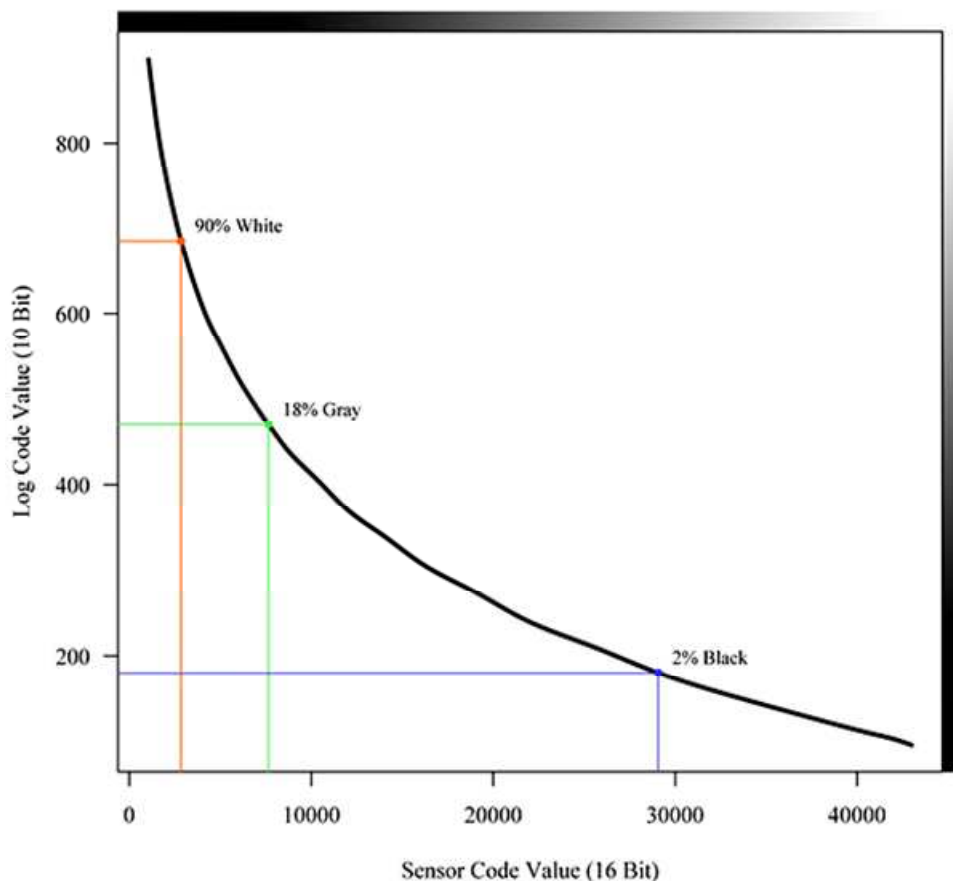


Principe de l'encodage au format Cinéon ¹⁷

Ce format permet de réduire la taille des fichiers, car l'équivalent d'un fichier codé linéairement sur 16 bits peut être stocké sur 10 bits log.

¹⁷ Harald Brendel, [hbrendel@arri.de], « Encoding of negative densities in the Cineon/DPX file format », in « Arri Companion to DI », Second Edition, in [arri.com], 2005.

La numérisation du scanner s'effectue en linéaire sur 16 bits, que l'on converti aussitôt en 10 bits log.



Principe de la conversion de 16 bits en 10 bits log¹⁸

Le format DPX

En 1994, la SMPTE (Society of Motion Picture and Television Engineers) standardise un nouveau format appelé DPX (Digital Moving-Picture Exchange), qui reprend les avantages du format Cineon.

Un fichier DPX peut être enregistré en 10 bits log, mais aussi en 8, 10, 12, ou 16 bits, en linéaire ou en logarithmique. Une entête intégrée au fichier précise son format.

Le principe des formats Cineon et DPX va être copié par les constructeurs de caméra pour concilier dynamique et réduction de débit. Examinons les caméras qui utilisent ce principe.

¹⁸ Harald Brendel, [hbrendel@arri.de], « Relation between sensor signal and log encoding. », in « Arri Companion to DI », Second Edition, in [arri.com], 2005.

2.2.2. La Viper et le Mode « FilmStream »

En 2004, les ingénieurs français de Thomson sortent une caméra numérique à l'esprit révolutionnaire, qui se veut un retour à la philosophie de la prise de vue argentique. Si le corps de la caméra est celui d'une caméra vidéo traditionnelle, Thomson propose un mode « négatif » d'enregistrement du signal. Avant d'expliquer en détail ce procédé, examinons les caractéristiques qui font de la Viper une caméra D-Cinéma.

2.2.2.1. Caractéristiques de la Viper

Thomson équipe sa caméra avec un capteur 3 CCD 2/3" FT.

La relativement petite taille du capteur entraîne une profondeur de champ assez importante. On est encore loin du rendu du flou en 35mm.

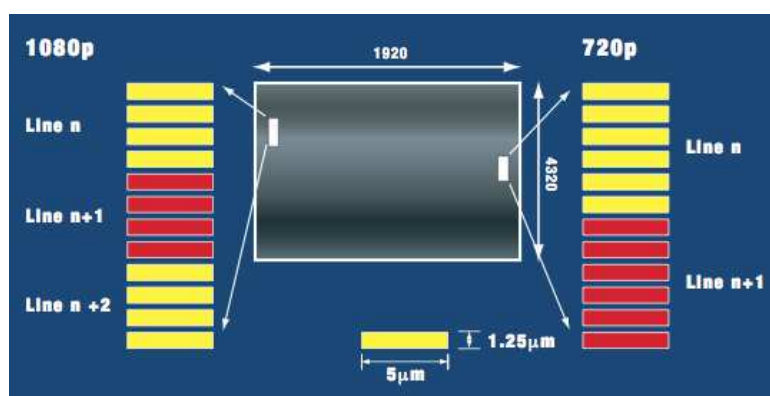
Ce capteur est refroidi par effet Peltier, ce qui permet d'avoir un niveau de bruit constant, indépendant de la température de la caméra.



La Viper équipée de son « magasin numérique »¹⁹

Le mode de transfert de charge du capteur, le mode FT (Frame Transfert), permet de gagner en surface photosensible, car les registres de transfert n'empiètent pas sur la surface du CCD. Par ce choix, Thomson augmente la largeur des pixels, et donc leur dynamique.

Le format d'enregistrement est de 1920 x 1080, mais les trois capteurs possèdent une définition réelle de 1920 x 4320. Ce nombre plus élevé de pixels en vertical permet à Thomson de développer une technologie baptisée HD-DPM (Digital Pixel Management Technology). Le but est de conserver une résolution native de 1920 x 1080 dans tous les ratios d'enregistrement.



En mode 1080P au format 16/9, chaque pixel est constitué de 4 sous-pixels verticaux.

En mode 720P 16/9, on dispose de 5 sous-pixels pour former un pixel.

Schéma de principe de la technologie HD-DPM pour le format 1.77²⁰

¹⁹ Illustration extraite de la documentation de Thomson, *Viper FilmStream Camera System*, n°CAM-10120-1, 2006, p.5.

²⁰ Illustration extraite de la documentation de Thomson, *Viper FilmStream Camera*, n° 3122 787 36600, p. 7.

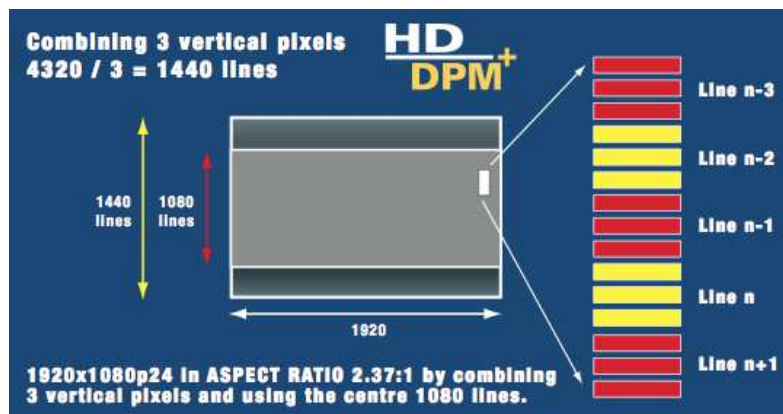


Schéma de principe de la technologie HD-DPM pour le format 2.37²¹

En mode 1080P au format Cinémascope 2.37, chaque pixel est constitué de 3 sous-pixels.

Cette combinaison astucieuse permet de conserver une résolution verticale de 1080 lignes pour tous les ratios d'enregistrement, même le 2.37. C'est appréciable, quand on sait que la plupart du temps en numérique, le format scope est réalisé en post-production en coupant dans l'image 16/9.

Deuxième avantage, l'angle de champ reste le même quand le format change.

Par contre, la sensibilité du capteur n'est pas la même pour tous les formats, puisqu'un pixel n'est pas constitué du même nombre de sous-pixels.

Pour compenser cette perte de sensibilité, les ingénieurs de Thomson ont appliqué un gain supplémentaire au signal lorsque l'on tourne au format scope. Cela induit une légère baisse du rapport signal sur bruit.

Le constructeur donne un EI de 320 pour le format 16/9, et un EI de 400 pour le 2.37.

Pour enregistrer en vitesse variable, la seule solution proposée par Thomson est d'enregistrer au format 720P (on enregistre 720 lignes au lieu de 1080), ce qui permet alors d'enregistrer à 60 images par secondes. Pour obtenir une vitesse comprise entre 24 et 60 images par seconde, Thomson suggère de retrancher des images en post-production. On est loin des prouesses de la Varicam...

Quant à l'angle d'obturation, il est variable de 45 à 312°.

L'atout de taille de la Viper est qu'elle propose d'enregistrer le signal en RVB 4 :4 :4 non compressé. Le débit est alors de 2,25 Gbits/s. On a le choix entre trois types d'enregistrement :

- Enregistrement sur Magnétoscope HD-Cam SR

Le problème de cette méthode est qu'on compresse le signal dans un rapport de 4,2 : 1. Elle a été utilisée sur les tout premiers films tournés en Viper, comme Collatéral de Michael Mann. A l'époque, les studios ne faisaient pas encore confiance à l'enregistrement sur mémoire flash et disque dur.

²¹ Illustration extraite de la documentation de Thomson, *Viper FilmStream Camera*, n° 3122 787 36600, p. 7.

- Enregistrement sur « Venom »

Le Venom est un enregistreur à mémoire flash d'une capacité de 10 min d'enregistrement. Il se fixe comme un magasin sur la caméra.

La caméra avec le Venom pèse environ 7 kilos, ce qui est plutôt léger pour une caméra de cinéma. A titre de comparaison, la Aaton 35, caméra 35 mm réputée pour sa légèreté, pèse dans les 6 kg.



Magasin numérique Venom²²

Le Venom est très silencieux en fonctionnement, puisqu'il n'utilise pas de bande magnétique. Une fois plein, il se décharge sur un enregistreur à disque dur pour pouvoir être réutilisé.

- Enregistrement sur disque dur

Par une double liaison HD-SDI, on peut envoyer le signal de la caméra vers un enregistreur à disque dur, sur lequel les images sont enregistrées au format DPX.

Le plus communément utilisé est le DFR du constructeur S.two. Il propose divers connectiques et un réceptacle à disque dur « D.MAG ».

Le D.MAG est un disque dur à niveau de sécurité élevé, conçu sur le modèle des disques durs militaires. Un D.MAG a une capacité de 36 minutes d'enregistrement en 4 :4 :4 non compressé.



Magasin numérique D.MAG²⁴



Le DFR de S.two²³

A la fin de la journée de tournage, les données de chaque « magasin numérique » D.MAG sont déchargées et sécurisées sur ordinateur. Selon Mathieu Straub de TSF Data : on retrouve un peu le cycle qu'on a en film de déchargement et chargement de magasins. Les données sécurisées sont transférées sur cartouche magnétique LTO (Linear-Tape-Open) pour être envoyées au laboratoire.

Ce système de transfert de données nécessite l'emploi d'une personne supplémentaire sur le tournage. Le loueur de caméras TSF a ainsi créé un département, TSF Data, qui se charge d'assurer le transfert des rushes sur place. *On trouve un lieu proche du tournage où on va effectuer toutes les sécurisations des rushes, le transfert sur une station de montage, la synchronisation du son, les sorties de DVD de rushes*, explique Matthieu Straub.

²² Extrait de la documentation de Thomson, *Viper FilmStream Camera System*, n°CAM-10120-1, 2006, p.6

²³ Illustration extraite de la documentation *S.two Digital Field Recording* in [www.stwo-corp.com], Mai 2005.

²⁴ Illustration extraite de la documentation *S.two Digital Field Recording* in [www.stwo-corp.com], Mai 2005.

Thomson propose deux modes de traitement du signal à l'intérieur de la caméra :

- **le Mode HD Video** : C'est un mode de traitement du signal vidéo classique : le signal est traité pour pouvoir être affiché sur un moniteur. Le signal est codé en 10 bits linéaires. L'utilisateur a le choix d'enregistrer en RGB 4:4:4 ou en composantes 4:2:2.

- **Le Mode FilmStream** : Chaudement recommandé par le constructeur, ce mode consiste en l'enregistrement d'une sorte de « négatif numérique » par la caméra. Nous allons en examiner les caractéristiques.

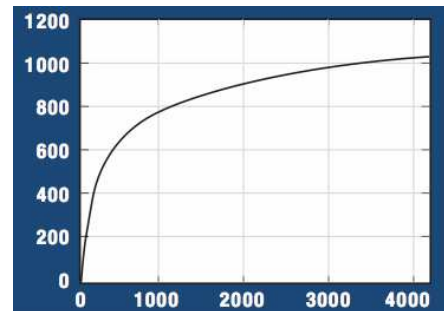
2.2.2.2. Le Mode « FilmStream »

Un mode « négatif »

Avec le mode « FilmStream, Thomson propose d'enregistrer le signal brut sans lui apporter aucune correction. Selon le constructeur, on évite ainsi « les manipulations irréversibles du signal vidéo ». Plus aucun traitement, ni post-knee, ni knee, ni balance des blancs.

En ce qui concerne la latitude d'exposition, Thomson abandonne la courbe de gamma, qui permettait d'agir sur le contraste de l'image enregistrée.

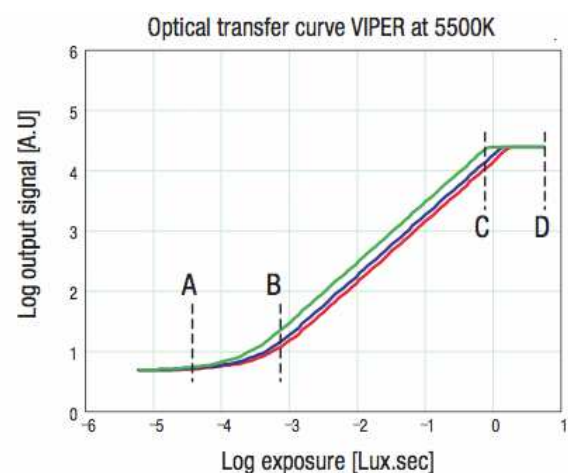
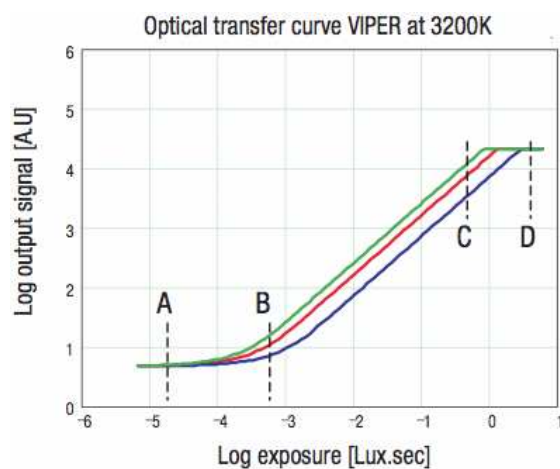
Il opte pour un format d'échantillonnage en 10 bits log, calqué sur le format Cineon, qui lui permet de conserver une grande latitude avec un débit acceptable. L'échantillonnage en sortie de capteur se fait sur 12 bits, qui sont aussitôt convertis en 10 bits log.



Conversion de 12 bits en 10 bits log²⁵

Courbes de transfert

Selon Thomson, la latitude d'exposition de la Viper est uniquement déterminée par la latitude d'exposition de son capteur. Le constructeur nous présente des courbes de réponse de la caméra dans un repère logarithmique, sur le modèle des courbes sensitométriques.



Courbes de réponse de la Viper, en lumière tungstène 3200K et en lumière du jour 5600K²⁶

²⁵ Illustration extraite de la documentation de Thomson, *Viper FilmStream Camera*, n° 3122 787 36600, p. 5.

Prenons le temps d'analyser ces courbes de réponse.

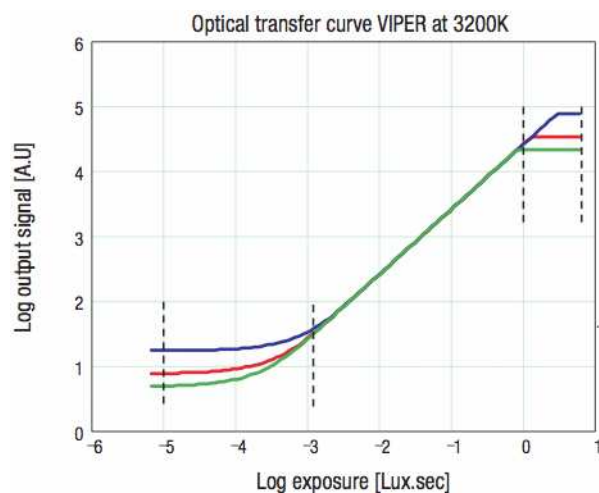
On observe que la partie rectiligne B-C a un contraste de 1, caractéristique des capteurs numériques. On relève une latitude d'exposition d'au moins 10 diaphragques.

La portion A-B concerne la non-linéarité de la caméra dans les basses lumières. C'est une zone où le bruit électronique est omniprésent.

La partie C-D correspond à la saturation du capteur. On observe que le capteur vert sature en premier, alors que les deux autres capteurs continuent d'enregistrer des informations. Cela a pour effet de produire du magenta dans les très hautes lumières.

Pour résoudre ce décalage de sensibilité entre les trois capteurs, Thomson propose d'utiliser un filtre optique magenta pour rééquilibrer les trois sensibilité.

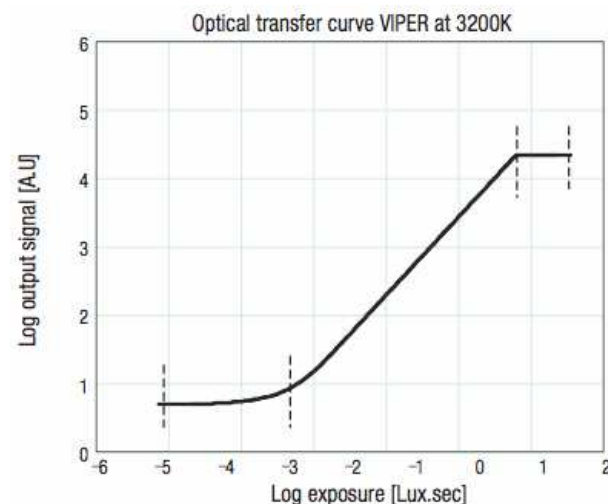
Filtrage Magenta



Voici la courbe de transfert obtenue après étalonnage, lorsqu'on n'utilise pas de filtre magenta à la prise de vue²⁷.

On voit que les ombres et les hautes lumières ont une coloration magenta.

On ne peut donc pas travailler dans la partie basse et la partie haute de la courbe. La latitude d'exposition est alors limitée à 10 diaphragmes.



Voici la courbe obtenue après étalonnage lorsqu'on utilise un filtre optique magenta²⁸. Le filtre permet d'obtenir des ombres et des hautes lumières sans magenta, ce qui permet de gagner en latitude.

On bénéficie alors de 12 diaph de latitude d'exposition.

²⁶ Illustration extraite de la documentation de Thomson, *The Viper Exposed*, n°CAM-1009, 2003, p. 1.

²⁷ Illustration extraite de la documentation de Thomson, *The Viper Exposed*, n°CAM-1009, 2003, p. 2.

²⁸ Illustration extraite de la documentation de Thomson, *The Viper Exposed*, n°CAM-1009, 2003, p. 2.

Thomson fournit le tableau suivant pour corriger l'écart de sensibilités entre les trois capteurs. On s'aperçoit que l'utilisation de ces filtres fait perdre beaucoup de sensibilité : entre 2 et 3 diaphs.

Color Temp (K)	Color Filter	Sensitivity Loss
3200	None	0
3200	CC60M + CC80C	2.9 stops
5600	None	0
5600	CC60M + CC81B	2.2 stops

Filtres de Correction en fonction de la température de couleur²⁹

Dans la réalité, les chefs opérateurs font un compromis en corrigeant seulement avec des filtres magenta, de moindre puissance. Cela leur évite de trop perdre en sensibilité. Sur Zodiac de David Fincher, le chef opérateur Harris Savides utilisait un magenta 20CC, qui lui faisait perdre 2/3 Ø. Sur La Peau Lisse, de Stéphanie Duvivier, le chef opérateur Denis Rouden utilisait, uniquement pour les extérieurs jours, un 10CC qui lui faisait perdre 1/3 Ø.

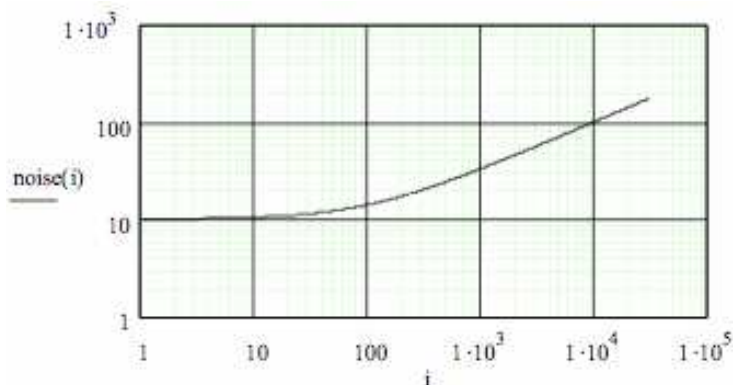
Latitude de pose

Avec 10 à 12 Ø de latitude d'exposition, on peut commencer à parler de latitude de pose. Le chef opérateur va pouvoir choisir où positionner son image sur la courbe, un peu comme en argentique.

Examinons la courbe fournie par Thomson donnant le niveau de bruit en fonction de l'exposition.

On s'aperçoit que le bruit augmente proportionnellement à l'exposition, à cause du bruit photonique qui est proportionnel au nombre de photons reçus.

On peut en conclure qu'il vaut mieux légèrement sous-exposer son image si on veut limiter le niveau de bruit.



Niveau de bruit en fonction de l'Exposition (exprimés en nombre d'électrons)³⁰

C'est un peu l'inverse de ce qui se pratique en prise de vue argentique couleur, où on a l'habitude de surexposer pour obtenir moins de grain.

²⁹ Illustration extraite de la documentation de Thomson, *The Viper Exposed*, n°CAM-1009, 2003, p. 2.

³⁰ B. Dierickx, *Noise as a function of exposure (both in electrons)*, in Jan van Rooy, Peter Centen, Mike Stekelenburg, *Viper FilmStream Camera : A Technical Overview*, p. 9.

Affichage

Si on essaye d'afficher sur un moniteur l'image brute issue de la caméra, on obtient une image très peu contrastée à dominante verte.

A la sortie de la caméra en 2004, Thomson ne semble pas avoir réalisé l'importance de l'affichage de l'image sur un tournage en numérique. Il ne propose pas de système de LUT (Look Up Table) d'affichage pour prévisualiser le rendu final de l'image sur un moniteur.

Pour aider le chef opérateur à régler l'exposition, Thomson lui propose de se fier à l'indication du zebra réglé à 100% dans le viseur, qui indique lorsque le CCD a atteint la saturation. Ou bien de se fier à sa cellule, comme en argentique.

Si le chef opérateur tient vraiment à afficher l'image sur un moniteur, Thomson propose d'utiliser la sortie vidéo de la caméra, qui a subi les corrections nécessaires à l'affichage. Or il est bien évident que cette sortie ne donne pas de réelle indication sur les valeurs de l'image enregistrée.

Ce sont les loueurs de caméra qui se chargent de résoudre le problème d'affichage de la Viper. Ils intègrent des LUT d'affichage au niveau de l'enregistreur S.two, ou au niveau du moniteur.

Voici la méthode utilisée pour produire des LUT chez le loueur de caméras TSF.

Les chefs opérateurs filment des essais des situations d'éclairage auxquelles ils seront confrontés. Le loueur prélève quelques images des plans sur une clef USB qu'il fournit au laboratoire. Le chef opérateur et l'étalonneur travaillent sur ces images pour convenir d'un pré-étalonnage. L'étalonneur fournit un fichier .lut au loueur, qui se charge de l'intégrer dans les appareils.

A présent que nous avons exploré les différentes potentialités de la caméra, examinons comment elles sont exploitées en pratique par les cinéastes.

2.2.2.3. Paroles de cinéastes sur la Viper

Collateral : Une gestion du rapport signal sur bruit

Pour *Collateral* (2004), Michael Mann a voulu utiliser une caméra qui soit capable de reproduire les couleurs du ciel nocturne de Los Angeles, teinté de mauve par les réflexions des lampadaires sur les nuages. L'originalité de l'utilisation de la Viper sur ce film est qu'elle n'a pas été utilisée en mode FilmStream, mais en mode HD Vidéo. Michael Mann voulait en effet obtenir une texture d'image particulière dans les basses lumières. Selon Paul Cameron, le premier chef opérateur du film : *Il est vite devenu évident que la seule façon d'obtenir l'image que Michael voulait était de tourner en mode HD et de pousser le gain sur les caméras.*³¹

Ils étaient de plus les tout premiers à utiliser cette caméra en long-métrage, et faisaient un peu figures de pionniers. Il n'y avait pas vraiment à l'époque de solution de LUT d'affichage, et tourner en mode HD était une façon de visualiser le rendu final de l'image.



Photogramme extrait de *Collateral* de Michael Mann (2004), tourné en Sony F900, Viper et 35mm.
Chefs opérateurs : Paul Cameron et Dion Beebe.

Les Vipers utilisées étaient reliées par fibre optique à l'enregistreur HD-Cam SR Sony SRW5000, car le laboratoire ne faisait pas encore confiance à l'enregistrement sur disque dur.

Comme les caméras Viper n'étaient pas tout à fait prêtes à l'époque en terme d'accessoirisation, l'équipe utilisait aussi des Sony F900.

Le but était de minimiser la différence de rendu entre les deux types de caméras. L'enregistrement des Sony F900 se faisait sur magnétoscope séparé HD-Cam SR en 10 bits, sauf pour les plans au steadicam où l'enregistrement se faisait en 8 bits sur le magnétoscope HD-Cam intégré à la caméra. Les réglages de MATRIX de la F900 étaient ajustés pour raccorder avec le rendu des couleurs de la Viper.

³¹ Jay Holben, « Hell on Wheels », *American Cinematographer*, Août 2004.

“It became pretty apparent early on that the only way to get the look Michael wanted was to shoot HD and push the gain on the cameras.”

Les caméras étaient poussées à +3dB et +6dB de gain. Dans la scène où les personnages se poursuivent dans un building éteint, la Viper est poussé à +9 dB et la 900 à +12dB. Paul Cameron trouve que la Viper est plus sensible que la F900, avec un niveau de bruit moins élevé.



Il constate : *En fait, tourner en HD a surtout à voir avec le rapport signal sur bruit.*³² Le bruit dans les basses lumières était beaucoup plus apparent en retour sur film que sur le moniteur HD. Paul Cameron explique la technique qu'il avait mise au point pour éviter que le bruit ne parasite trop le visage des acteurs : *Notre plus gros soucis était de gérer le bruit dans les scènes qui montre Tom et Jamie dans le taxi, et qui représentent à peu près un tiers du film. Nous avons découvert qu'il fallait amplifier le signal – c'est-à-dire l'apport de lumière – sur les visages des acteurs pour obtenir un niveau IRE acceptable, en sachant que nous le baisserions plus tard à l'étalonnage.*³³ Le niveau IRE s'établit en pourcentages de l'amplitude maximale du signal vidéo.

100 IRE = 100% = 700mV

Ainsi, les visages qui se trouvaient en dessous de 20 IRE à +3dB et 30 IRE à +6dB avaient un niveau de bruit inacceptable pour Paul Cameron. Cela correspondait à des mesures de lumière incidente de $-2\text{Ø}1/3$ et $-1\text{Ø}1/2$.

Pour son film suivant, *Miami Vice*, Michael Mann continue d'explorer les possibilités de rendu amenées par le gain et le bruit qui en résulte. Il exploite à nouveau la Viper en mode HD Vidéo.

³² Jay Holben, opus cité.

« Basically, HD shooting has to do with signal-to-noise ratio. »

³³ Jay Holben, « Hell on Wheels », *American Cinematographer*, Août 2004

« Our biggest concern was how to deal with the noise in scenes that show Tom and Jamie in the cab, and those scenes comprise about one-third of the movie. We discovered we had to increase the signal — meaning the amount of light — on the actors' faces to an acceptable IRE level [registered on a waveform monitor], knowing that we'd later bring it down digitally with Power Windows in color correction before the film-out. ».

Miami Vice et la lumière du jour

Alors que les extérieurs jours de *Collateral* étaient tournés en 35mm, le chef opérateur Dion Beebe se risque cette fois à utiliser la Viper pour tourner de jour :

*On sait très bien qu'en HD on possède beaucoup moins de latitude dans les hautes lumières qu'en pellicule. (...) Un des décors, une villa avec une gigantesque baie vitrée donnant sur Biscayne Bay, était particulièrement compliqué à tourner en HD. Comme je ne pouvais pas dépasser deux diaphs de surexposition sur la découverte, il m'a fallu massivement rééclairer l'intérieur du décor jusqu'à un niveau d'environ 22 de diaph !*³⁴



Photogramme extrait de *Miami Vice* de Michael Mann (2006), tourné en Viper, Sony F950, F900 et 35 mm. Chef opérateur Dion Beebe

Pour cela, le chef opérateur est obligé de placer trois HMI de 18kW à seulement quatre mètres des comédiens, isolés par des gélamines anticaloriques et une vitre de sécurité. *Ce n'est évidemment pas le genre de chose qu'on aime imposer aux acteurs en tant que chef opérateur, mais vu le décor, et l'impossibilité de gélaminer quoi que ce soit ou de placer des cadres de tarlatane pour baisser visuellement le niveau de la lumière extérieure, c'était la seule solution en HD.*³⁵

Cette petite anecdote évoque un peu les temps héroïques du Technicolor, où les cinéastes devaient réussir à impressionner une pellicule de seulement 8 ASA au moyen d'énormes projecteurs. Peut-être pourra-t-on dire plus tard qu'on a vécu des temps héroïques avec les débuts de la captation numérique...

³⁴ François Reumont, *Miami Vice, ou l'art de maîtriser la lumière en HD*, Technicien du film n°569, Septembre 2006, p. 37.

³⁵ François Reumont, opus cité.

L'Hyper-Réalisme de Zodiac (2007)

Dans *Zodiac*, David Fincher reconstitue avec minutie les détails d'une enquête policière menée à la fin des années 70.

Harris Savides, le chef opérateur du film, perçoit ainsi le choix de tourner en Viper : *La Viper donne aux images une impression d'hyper-réalité, qui pouvait fonctionner avec ce film en particulier. (...) Avec la Viper, le public verra plus de choses que ce qu'il peut voir habituellement dans un film – littéralement, les pores de la peau sur le visage des acteurs, et chaque cheveu sur leurs têtes – ce qui peut provoquer un effet d'immersion. Votre œil peut inspecter le cadre pendant que toutes ces informations, les faits de l'affaire, viennent à vous.*³⁶ Selon David Fincher : *Harris trouvait initialement que les images avaient une texture un peu plastique, moi je pensais que ça allait nous aider. (...) Le film ressemble à un reportage télévisé, pas à un film hollywoodien.*³⁷



Photogramme extrait de la bande-annonce de *Zodiac* de David Fincher (2007), tourné en Viper, Chef opérateur Harris Savides

Les cinéastes utilisent la Viper en mode « optimal » : ils enregistrent en mode FilmStream et sans compression sur disque dur. Ce choix leur permet de réaliser de nombreuses d'incrustations, en particulier d'images de télévision.

Au lieu d'utiliser une LUT, Harris Savides préfère afficher sur le moniteur l'image brute issue de la caméra, sa dominante verte étant corrigée par un filtre optique magenta 20CC. *En ce qui concerne mon travail de mise en lumière, je me suis très rapidement habitué à l'image brute et j'ai préféré travailler avec elle plutôt qu'avec une image pré-étalonnée.*³⁸

³⁶ David E. Williams, *Cold Case File*, American Cinematographer, Avril 2007.

« *The Viper does give the images an almost hyper-real quality that might work for this particular film. With the Viper, the audience will see more than what they normally see in a movie – literally, the pores on people's faces and every hair on their heads - so it may have an almost immersive effect. Your eye can search the frame as all this information, the facts of the case, come at you.* »

³⁷ David E. Williams, opus cité.

« *Harris initially thought the images looked a little « plastic-y », but I thought that helped us. (...) It feels like a news report, not a Hollywood movie.* »

³⁸ Benoît Guerville et Mireille Frenette, *Fincher inaugure la captation virtuelle*, Sonovision Digital Film, Supplément au Sonovision Broadcast n°518, Mai 2007.

Le chef opérateur explique ainsi sa méthode pour régler l'exposition : *Je me suis très vite rendu compte que travailler avec une cellule ne convenait pas au cinéma numérique. L'approche est différente et il est finalement plus efficace de travailler à l'instinct. Les moniteurs HD sont extrêmement performants et fiables, même s'ils ont tendance à surcompenser un peu en basse lumière. La caméra est annoncée à 300ASA, mais je trouve qu'il est pratiquement impossible de lui fixer une sensibilité. Personnellement, j'aurais plutôt tendance à dire que sa sensibilité se situe entre 500 et 800 ASA. Mais au final, avec de bons moniteurs, votre œil reste le meilleur outil de mesure. Je dirais que le plus gros problème reste encore les hautes lumières, qu'il faut absolument éviter.*³⁹

Le chef opérateur évoque en ces termes la difficulté de rendu des hautes lumières : les plans en contre-plongée montrant des tubes fluorescents dans le champ étaient durs. *La difficulté était de contrôler le rendu de ces éclairages surexposés. (...) Cela aurait été beaucoup plus facile à faire si nous avions tourné en film – l'épaule de courbe est un point faible de la Viper.*⁴⁰

L'autre point faible de la caméra est sa profondeur de champ élevée, due à la petite taille de ses capteurs 2/3". Chris Blauvelt, le premier assistant opérateur, trouve des solutions pour permettre à David Fincher de « mettre en scène » le point. : *Dans les scènes où il voulait laisser le fond flou, (...) nous déterminions la profondeur de champ et nous faisons le point à une distance en avant de Jack, pour que son visage soit à la limite de la zone de netteté.*⁴¹

Harris Savides fait un bilan de l'utilisation pratique de cette caméra : *Je n'aimais pas le viseur, le cordon ombilical relié au magnétoscope, et le fait d'avoir besoin d'un technicien spécialisé en imagerie numérique pour allumer la caméra. (...) Dans le futur, je vois des caméras à la fois plus petites et plus performantes, nécessitant moins de techniciens pour s'en occuper, une méthode de travail qui soit plus libre et moins encombrée par la technologie. Mais c'est loin d'être le cas aujourd'hui.*⁴²

³⁹ Benoît Guerville et Mireille Frenette, opus cité.

⁴⁰ David E. Williams, opus cité.

With the Viper, low-angle shots aimed right up into the fluorescents were tough. The difficulty was in controlling the look and not letting those sources overexpose. (...) Incidentally, it would have been much easier to do if we'd been shooting on film – the shoulder is a weak spot on the Viper.

⁴¹ David E. Williams, *Cold Case File*, American Cinematographer, Avril 2007.

« In scenarios where he wanted to let a distracting background to go soft (...) we'd determine the depth of field and just focus some distance ahead of Jack, so his face would be at the outer edge of what was sharp. »

⁴² David E. Williams, opus cité.

« I didn't like the viewfinder, the umbilical cord to the recorder, or the need for a digital-imaging technician just so you can turn the camera on. (...) In the future, I see smaller, better cameras ; fewer crewmembers needed to service them ; and a method of production that's freer and less encumbered by technology. But that's not the situation right now. »

La Viper est une caméra D-Cinéma qu'on peut qualifier d'hybride, surtout du fait de la petite taille de ses capteurs. Conçue pour le cinéma, elle garde un look un peu « vidéo » exploité comme tel par les cinéastes. Elle est en tout cas la première caméra à proposer une philosophie « négative » de l'enregistrement du signal numérique. Avec elle, on se remet à parler de latitude de pose. On voit poindre aussi l'un des défauts des caméras D-Cinéma : l'absence d'épaule de courbe pour compresser les hautes lumières.

Nous pouvons lui comparer une autre caméra numérique conçue spécifiquement pour le cinéma, qui connaît actuellement un franc succès : la Panavision Genesis.

2.2.3. La Genesis et la Courbe « Panalog »

Lancée à la fin de l'année 2004, la caméra « Genesis » est le fruit d'une collaboration entre Panavision et Sony, qui a démarré en 2000 avec la création d'une filiale commune, DHD Ventures.

En 2004, Panavision rachète la part de Sony dans l'entreprise, et peut revendiquer seule la paternité de la Genesis, reléguant Sony au rang « partenaire technologique »



L'imposante Genesis sur fond de ciel bleu ⁴³

2.2.3.1. Caractéristiques de la Genesis

Ce qui fait de la Genesis une véritable caméra de cinéma numérique est qu'elle est équipée d'un capteur mono-CCD d'une taille comparable au super-35 mm.

Elle peut ainsi recevoir les optiques Panavision traditionnelles. La profondeur de champ obtenue est proche de celle du 35 mm.

La grande taille du capteur va permettre des pixels plus larges, et ainsi favoriser la dynamique et la sensibilité de la caméra. Panavision annonce un indice d'exposition de 400, et une latitude d'exposition de 10 diaphragmes.

Le choix d'un mode de transfert à interligne (IT) réduit potentiellement la dynamique de la caméra, puisque les registres de transfert empiètent sur la surface photosensible du capteur. Mais cela évite l'utilisation d'un obturateur mécanique, obligatoire dans le cas d'un capteur FT (Frame Transfert). Et offre à la caméra des angles d'obturation ouverts jusqu'à 360°. À titre de comparaison, la Viper, avec ses capteurs FT, est limitée à 312° d'obturation.

Panavision reconnaît que la caméra peut être sujet au défaut typique des capteurs IT : le Smear. Ce défaut apparaît lorsqu'un excès d'électrons, provoqué par un sujet extrêmement lumineux, pollue le registre vertical de transfert, générant une ligne blanche. Pour rassurer les utilisateurs, le constructeur compare ce défaut au flare horizontal du scope...

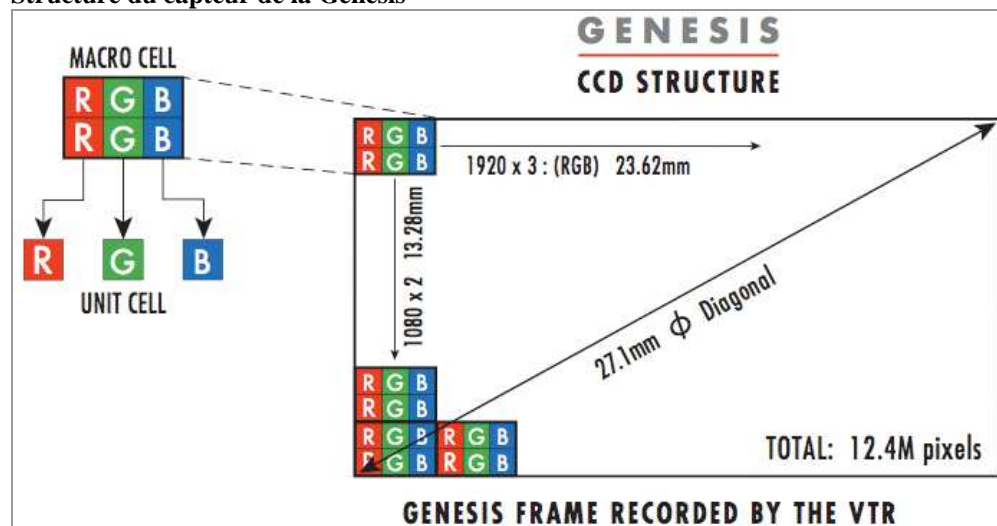
Le capteur est tempéré par un système de refroidissement liquide, permettant un niveau de bruit électronique constant. Lorsque la caméra tourne à plus de 24 images par seconde, des ventilateurs entrent en jeu.

Panavision a pris toutes les précautions nécessaires pour éviter l'endommagement du capteur. Une glace optique s'intercale entre l'optique et le capteur pour le protéger de la poussière. Comme cette glace est positionnée en avant du point de convergence des rayons, la poussière qui se dépose dessus n'est pas visible à l'image. De plus, dès que la caméra se trouve hors tension, un obturateur mécanique se met en place pour protéger le capteur.

⁴³ Brochure Genesis in [www.panavision.fr]

La résolution native du capteur CCD est de 5760 x 2160 photosites. L'analyse trichrome peut se faire grâce à une structure de filtres à bandes R, V, B positionnés sur le capteur. Chaque point image est ainsi formé à l'aide de 6 photosites, deux de chaque couleur. On obtient ainsi une résolution d'image de 1920 x 1080, sans avoir besoin de procéder à une quelconque interpolation.

Structure du capteur de la Genesis⁴⁴



En largeur, le capteur de la Genesis a une taille intermédiaire (23,62 mm) entre le format standard en 35 mm (22 mm) et le Super-35 (24,89 mm). Le capteur a un ratio de 1.77, ce qui l'empêche d'enregistrer des images en scope anamorphosé.

L'enregistrement s'effectue en RVB 4:4:4 sur un magnétoscope HD-Cam SR, le SRW1, qui se fixe comme un magasin sur la caméra. Albert L. Mayer, directeur du département Research & Development de Panavision, explique ainsi ce petit clin d'œil aux caméras films : *Nous avons voulu générer un système entièrement basé sur un « style film ». Trouver toutes les astuces pour être capable d'utiliser le VTR comme on le ferait avec un magasin film, au-dessus ou à l'arrière de la caméra. Nous avons voulu créer un système confortable pour les cinéastes qui viennent du monde du film et qui entrent dans l'univers du numérique pour la première fois.*⁴⁵

L'avantage du format HD-Cam SR est qu'il enregistre en 10 bits, ce qui préserve la dynamique de la caméra. Deux modes d'enregistrement sont possibles sur le SRW1 : Un mode d'enregistrement standard SQ (Standard Quality), le plus utilisé, qui offre un débit de 440 Mb/s avec un taux de compression de 4,2 :1. Les cassettes ont alors une autonomie de 50 min à 24 images par seconde.

Un mode d'enregistrement moins compressé (High Quality, HQ), mais très peu utilisé car ne pouvant être relu que par le SRW1, et pas par les magnétoscopes HD-Cam SR communément utilisés en post-production. Il offre un taux de compression de 2:1 et un débit de 880Mbits/s.

⁴⁴ Genesis : the FAQs, in [www.panavision.com], p. 1.

⁴⁵ Jay Holben, *Soyons Numériques ! Panavision dévoile son système de Caméra numérique Super 35*, American Cinematographer, Septembre 2004.

Nous sommes arrivés à la limite de ce qui était possible avec une bande à particules métalliques, prévient John Galt, vice-président senior du département HD de Panavision.⁴⁶ Si le constructeur joue cette fois encore la carte de l'enregistrement sur bande, le futur s'envisage plutôt avec des enregistreurs sur mémoire flash ou sur disque dur pour pouvoir augmenter les débits d'enregistrement....

Le grand avantage de cet enregistreur embarqué est que la caméra gagne en autonomie, même si elle reste généralement reliée à un moniteur HD par une liaison HD-SDI 4 :2 :2.

En ce qui la vitesse variable, la Genesis peut tourner à des vitesses allant de 1 à 50 images par seconde, mais sans changement de vitesse au cours de la prise de vue. Avec une petite subtilité : les vitesses de 30 à 50 images par seconde doivent être enregistrées en 4 :2 :2, la vitesse maximale de défilement de la bande étant atteinte. L'obturateur électronique quant à lui est réglable de 3,8 à 360°.

Avec son enregistreur SRW1 et sans optique, la caméra atteint tout de même les 13kg. Ce poids se révèle problématique pour les plans tournés au steadicam. Pour les plans au steadicam du *Deuxième souffle* d'Alain Corneau, l'enregistreur était porté par un machiniste qui suivait l'opérateur steadicam, Valentin Monge. On peut dans ce cas parler de retour en arrière...

Au rayon des inconvénients, la caméra consomme énormément d'énergie, du fait de son capteur CCD, et les batteries doivent être changées à peu près 4 fois plus souvent qu'avec une caméra film. L'électronique de la caméra devant être alimentée en 12V, et les accessoires de Panavision fonctionnant en 24V, le constructeur a conçu un nouveau type de batterie délivrant dans un même câble du 12V et du 24V.

Panavision prévient l'utilisateur que comme toute caméra électronique, la Genesis est sujette aux interférences électroniques, que peuvent causer par exemple de gros talkies-walkies ou des ballasts de projecteurs.

Le menu de la caméra ressemble énormément à celui d'une Sony F900, avec toutefois beaucoup moins de paramètres réglables. On peut choisir d'afficher certains paramètres sur un panneau latéral, ce qui permet à l'assistant d'y accéder directement. Panavision conseille de ne toucher à aucun réglage d'image, hormis la température de couleur et le gain. En effet, le constructeur propose lui aussi un mode d'enregistrement « négatif » pour préserver toute la latitude d'exposition de la caméra. La Genesis, selon John Galt, *n'est pas réellement une caméra vidéo. Nous la considérons plutôt comme une caméra film numérique.*⁴⁷

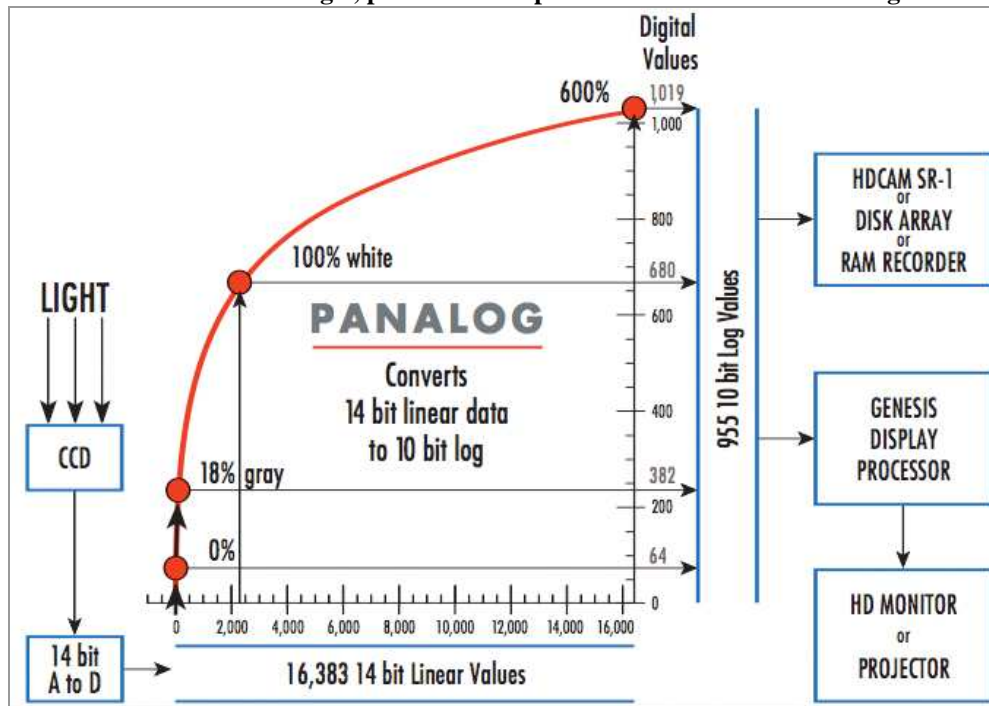
⁴⁶ Jay Holben, *Soyons Numériques ! Panavision dévoile son système de Caméra numérique Super 35*, American Cinematographer, Septembre 2004.

⁴⁷ Jay Holben, opus cité.

2.2.3.2. La Courbe « Panalog »

Pour préserver la dynamique du capteur, Panavision propose d'enregistrer l'image de la Genesis comme un « electronic intermediate ». Comme pour le mode FilmStream de la Viper, il s'agit d'enregistrer l'image en 10 bits log sans lui faire subir aucun traitement. La numérisation en sortie de capteur se fait sur 14 bits. La courbe de transfert utilisée pour passer des 14 bits linéaires aux 10 bits log est baptisée « Panalog 4 ».

Courbe de transfert Panalog 4, permettant de passer de 14 bits lin à 10 bits log⁴⁸



La latitude d'exposition annoncée par Panavision est de 10 diaphragmes. Si on travaille avec un indice d'exposition de 400, on dispose d'à peu près 4 diaphragmes en surexposition et 6 en sous-exposition.

Contrairement à la Viper, la Genesis laisse à son utilisateur la possibilité d'agir sur le gain. Pour le reste, aucun traitement n'est appliqué au signal, hormis la possibilité de régler le « preset » de température de couleur.

Et la latitude de pose ? Allen Daviau, chef opérateur de Spielberg, a dirigé les premiers essais de lancement de la caméra. Il semble assez dubitatif sur la latitude de pose de cette caméra : *Elle capte vraiment plus d'informations dans les hautes lumières, mais elle a ses limites. Je pense que la chose la plus difficile à comprendre est qu'on peut faire de jolies images avec ces caméras haute définition, mais on ne peut pas capter des informations qui ne sont pas visibles dans l'image pour laquelle on a exposé. Il faut être très précis sur l'endroit où on place l'exposition.*⁴⁹

⁴⁸ The Panalog Curve transforms 14 bit linear to 10 bit log, Genesis : the FAQs, in [www.panavision.com], p.2.

⁴⁹ Jay Holben, Soyons Numériques ! Panavision dévoile son système de Caméra numérique Super 35, American Cinematographer, Septembre 2004.

La « Gamma Box »

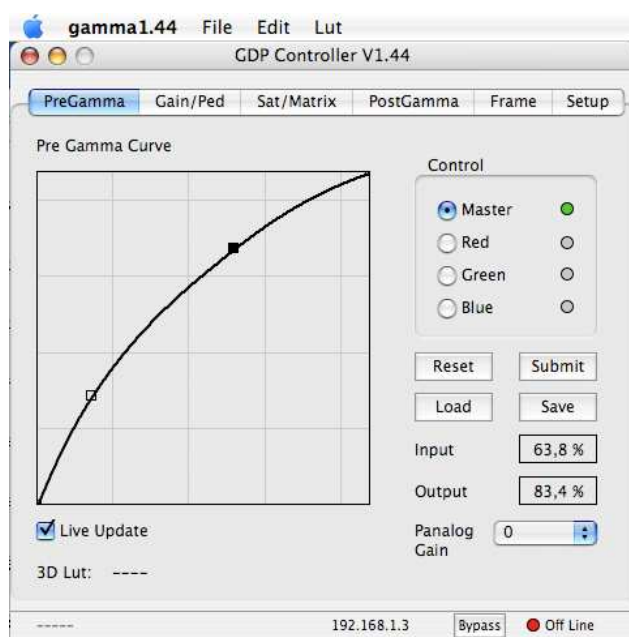
Pour régler le problème de l'affichage de l'image durant le tournage, Panavision a sorti fin 2006 un boîtier baptisé « Gamma Box », qui peut contenir 6 LUTs d'affichage. L'affichage de l'image brute issue de la caméra se fait alors par l'intermédiaire de ce boîtier, qui convertit le signal suivant la LUT d'affichage sélectionnée.



Face avant de la Gamma Box ⁵⁰

Pour établir ses propres LUTs d'affichage, le chef opérateur a le choix entre deux méthodes.

La première, dont nous avons déjà parlé pour la Viper, consiste à tourner des essais de lumière et à les faire étalonner. Le laboratoire fournit alors une LUT 3D qui est intégrée à la gamma box.



Ecran principal du logiciel Gamma ⁵¹

La deuxième méthode proposée par Panavision est de se servir d'un petit logiciel baptisé « Gamma » qu'on installe sur un ordinateur relié à la Gamma Box. Lors de ses essais, le chef opérateur peut dessiner une courbe d'affichage qu'il visualise en temps réel sur le moniteur. Il peut agir sur la forme de la courbe de gamma, mais également sur la saturation et le matriçage des couleurs.

Il montre ensuite ses images à l'étalonneur par l'intermédiaire de la Gamma Box. L'étalonneur est alors en mesure de lui fournir une LUT 3D qui reprend la courbe d'affichage dessinée.

Le logiciel peut également être utilisé sur le tournage pour disposer d'un plus grand choix de LUTs. C'est la méthode qu'a employée le chef opérateur Yves Angelo sur le tournage de *la Jeune fille et les loups* de Gilles Legrand (2007).

⁵⁰ Draft Panavision Gamma GDP Manual in [panavision.com.au], p. 7.

⁵¹ Logiciel téléchargeable à l'adresse [http://adi.panavision.com/gdp]

2.2.3.3. Paroles de Cinéastes sur la Genesis

Superman Returns de Bryan Singer (2006)

Comptant parmi les premiers utilisateurs de la Genesis, Bryan Singer et son chef opérateur Newton Thomas Sigel avaient envisagé dans un premier temps de tourner *Superman Returns* en 70 mm. Devant y renoncer pour des raisons pratiques, ils se rabattent sur la Genesis, dont l'image exempte de grain leur paraît plus « nette » que le 35 mm.



Superman Returns de Bryan Singer (2006), tourné en Genesis, Sony F950 et 35 mm, Chef opérateur Newton Thomas Sigel

Newton Thomas Sigel rappelle en ces termes les avantages et les inconvénients de ce type de caméra : *Comme je suis un chef opérateur-cadreur, j'ai dû m'habituer aux viseurs électroniques, qui sont horribles pour juger d'une lumière. En contrepartie, j'avais un moniteur Sony HD 24 pouces, qui me donnait un retour incroyable sur mon travail.*⁵²

Le chef opérateur analyse ainsi la latitude d'exposition de la caméra : *On doit soigner un peu plus les hautes lumières, parce qu'il y a moins de latitude d'exposition qu'en film, mais on peut aller plus loin dans les noirs que si on tournait avec une négative.*⁵³ (...) *La Genesis est vraiment impressionnante dans sa capacité à encaisser les ombres. Cependant, cela peut aussi s'avérer un piège car si vous descendez très profond dans les basses lumières et que vous ne faites pas suffisamment attention, vous vous retrouvez avec un bruit vidéo assez gênant.*⁵⁴

Dans le film, l'image sans grain, un peu lisse de la Genesis s'intègre parfaitement avec les nombreuses images de synthèse.

⁵² Robin Rowe, *Superman returns in super HD*, HD Magazine, Mai 2006, p.14, in [www.definitionmagazine.com].

« *Since I'm a DOP/operator, I had to get used to the video viewfinders, which from a lighting point of view are horrible. On the other hand, I had a 24 inch Sony HD Monitor that gave me an amazing look at my lighting.* »

⁵³ Robin Rowe, opus cité.

« *You have to protect your highlights a little more, because there's slightly less range than on film, but you can also go a lot farther into the blacks than if shooting negative.* »

⁵⁴ Mireille Frenette et Benoît Guerville, *De retour et sans pellicule*, Sonovision Broadcast n°509, juillet-août 2006, p. 58.

Jon Thum est superviseur d'effets spéciaux pour la société Framestore CFC, qui a travaillé sur à peu près 300 plans du film. Il illustre ainsi la particularité de l'image de la Genesis : *Normalement, à l'étape du « compositing », nous « floutons » les images de synthèse et nous leur ajoutons du grain pour qu'elles s'intègrent mieux aux prises de vues réelles. Avec cette caméra, nous ne pouvons rien flouter, car les images qu'elle produit sont extrêmement nettes, et nous ne pouvons pas non plus ajouter de grain, parce que la caméra ne génère pas de bruit. Nous avons dû donner un rendu plus net à nos images de synthèse, mais ce n'était pas un problème.*⁵⁵



On est saisi par la similitude de texture qui existe entre les images captées par la Genesis et les images de synthèse réalisées en post-production...

Jonathan Rothbart, de la société The Orphanage, qui quant à elle a travaillé sur 129 plans du film, confirme ce sentiment : *On percevait tellement de détails qui sont d'ordinaire adoucis par la pellicule – les barbes naissantes, les imperfections de la peau – qu'ils ont du retoucher de nombreux plans. Par exemple, il y a eu beaucoup de retouches sur les yeux, parce qu'on voyait les lentilles de contact de Routh.*⁵⁶ (Brandon Routh étant l'interprète de Superman).

⁵⁵ Barbara Robertson, *How Panavision's Genesis Made Life Interesting For the VFX Crews on Superman Returns*, Film & Vidéo, in [www.studiodaily.com/filmandvideo/], 12 juin 2006.

« Normally when we composite we blur the CG and add film grain so it sits in the plates nicely. With this camera we can't blur anything because the plates are so sharp, and we can't add grain because there's no noise in the camera. We had to make our stuff look sharper, but it wasn't a problem. »

⁵⁶ Barbara Robertson, *opus cité*.

« There was so much detail that normally gets softened on film — shaving shadows, rough areas on the face — that they had to alter what they shot. For example, there were a lot of eye fixes because you could see Routh's contacts. »

Apocalypto de Mel Gibson (2006)

Apocalypto met en scène le parcours cauchemardesque d'un chasseur vivant au 15^e siècle en Amérique centrale. Capturé par des guerriers mayas, il échappera deux fois à une mort certaine : une première fois grâce à une éclipse de soleil providentielle, et une deuxième fois grâce à l'arrivée opportune de Christophe Colomb...

Malgré ses faiblesses scénaristiques, le film est intéressant sur le plan technique. Il place la caméra Genesis dans des conditions lumineuses extrêmes : celles de la forêt tropicale du Mexique. La caméra semble réagir extrêmement bien aux écarts de luminosités rencontrés. On est très loin d'un rendu inversible des hautes lumières...



**Affiche promotionnelle d'Apocalypto de Mel Gibson (2007), tourné en Genesis, 35 mm (5218 500T et 5201 50D) et 16 mm (7218),
Chef opérateur Dean Semler.**

Le rendu des hautes lumières sur la photographie n'est pas vraiment représentatif de l'ensemble du film, dans lequel les hautes lumières ressortent avec beaucoup de détails, évoquant presque le rendu qu'on peut obtenir avec une pellicule négative...

Le chef opérateur Dean Semler prend la caméra à 640 ASA, pour tenir compte de sa grande latitude d'exposition dans les noirs. Pour gagner en sensibilité sur certains plans, il règle l'obturateur électronique à 360°, et pousse le gain à +6dB, obtenant une sensibilité équivalente de 2560 ASA. Il se justifie ainsi : *A ces niveaux de lumières extrêmement bas, la Genesis voit ce que notre œil ne voit pas, ce que l'on a jamais l'habitude de voir. Je préfère un obturateur à 270° et un gain à 3dB, pour avoir moins de flou de bougé et de bruit, pour un ASA de 1280. Mais dans les cas désespérés, j'ai poussé la caméra à fond.*⁵⁷

Dans les plans de poursuite, le chef opérateur se sert de l'obturateur à des fins esthétiques : Durant les panoramiques et les travellings rapides, la frénésie des mouvements de caméra était intensifiée par le flou de bougé de l'obturateur réglé à 360°.⁵⁸

⁵⁷ Cité par Benjamin B, *A great escape*, American Cinematographer, janvier 2007, in [www.ascmag.com].

« At these extremely low light levels, the Genesis sees what your eye doesn't, what you've never been accustomed to seeing. I prefer a 270-degree shutter and a 1/2 stop of gain for less blur and noise at an ASA of 1280, but in desperate times, I have gone all the way. »

⁵⁸ Cité par Benjamin B, *A great escape*, American Cinematographer, janvier 2007, in [www.ascmag.com].

« The frantic feel of fast-moving cameras was heightened by the motion blur that resulted from the 360-degree shutter on the Genesis during fast panning or tracking. »

Le chef opérateur fait passer un ultime test à la Genesis, en filmant des scènes de groupe éclairées essentiellement par des flammes : *Mon inquiétude était que le feu soit trop clair et les visages pas assez éclairés, mais la dynamique était superbe. Je n'ai pas eu de soucis avec les hautes lumières, ni de problème de flare.*⁵⁹

En ce qui concerne l'affichage sur le tournage, tout avait été calibré par le laboratoire chargé de la post-production numérique, Efilm. Bill Feightner, responsable technique chez Efilm, explique : *Dean Semler utilisait un moniteur HD 24 pouces dans une tente sur le plateau pour obtenir un rendu très fidèle. Le soir, il regardait les rushes en projection numérique dans une caravane, avec une grande image encore plus fidèle.*⁶⁰ EFilm avait créé pour le tournage un boîtier baptisé « ColorStream », qui permettait d'appliquer les LUTs d'affichage à l'image. C'est le principe de ce boîtier qui a été repris par Panavision pour la Gamma Box. Les LUTs tenaient compte à la fois de l'étalonnage prévu et du retour sur film. Selon Joe Matza, président de Efilm : *Même si Dean tournait en numérique, la sortie était planifiée sur pellicule Vision Premier. Nous avons donc préparé une émulation du rendu exact de ce positif sur son écran.*⁶¹

À noter que le chef opérateur de la deuxième équipe, Richard Merryman, n'avait pas d'outil de prévisualisation et se servait uniquement de sa cellule. Il regardait les rushes le soir en projection numérique.

⁵⁹ Benjamin B, *A great escape*, American Cinematographer, janvier 2007, in [www.ascmag.com].

« My concern was that the fire would be too bright and the faces not quite bright enough, but the range was superb. I had no trouble in the highlights, and it didn't flare out. »

⁶⁰ Entretien avec Benjamin B, *L'avenir de la couleur*, Lumières n°2, les cahiers AFC, 2006, p.89.

⁶¹ Entretien avec Benjamin B, opus cité, p.87.

Le Deuxième Souffle d'Alain Corneau (2007)

Sur les traces de Melville, Alain Corneau a voulu lui aussi se livrer à l'exercice de style d'adapter le roman de José Giovanni.



Photographie promotionnelle du Deuxième Souffle d'Alain Corneau (sortie prévue en 2007), tourné en Genesis et en 35mm, Chef opérateur Yves Angelo

Son chef opérateur Yves Angelo reconnaît volontiers que la captation numérique n'a pas encore atteint le niveau de l'argentique : *Il ne faut pas établir de hiérarchie entre le film et la vidéo. Si les supports sont comparés, le film est mieux, c'est évident.*⁶²

Pour lui, l'intérêt de la prise de vue en numérique réside dans le rapport nouveau qui s'instaure entre le metteur en scène et l'image qu'il est en train de créer : *Ce qui intéresse Alain Corneau, c'est la possibilité de bien voir ce qu'il est en train de faire. Il souhaite avoir un rapport direct avec une image quasiment finalisée, ce qui n'est pas le cas du film où l'on regarde soit à travers un petit écran vidéo de piètre qualité, soit trop éloigné de l'acteur.*⁶³

La prévisualisation de l'image quasi finalisée sur le moniteur est donc primordiale pour Yves Angelo. Pour la plupart des scènes du film, le chef opérateur a prévu de donner à l'image une dominante chaude assez prononcée. Au lieu de placer des filtres optiques sur la caméra qui lui auraient fait perdre en sensibilité, il se sert de LUTs d'affichage pour prévisualiser la couleur qui sera appliquée à l'étalonnage :

*Nous profitons du numérique à 100%. L'image a une texture et une coloration particulière, déterminée au moment des tests. Au lieu de filtrer l'image, je la traite directement par une courbe virtuelle. Cela facilite beaucoup de choses. Je n'ai pas besoin de filtrer, de mettre de gélamines sur les projecteurs. Nous utilisons les qualités d'un support en essayant de minimiser ses défauts.*⁶⁴

Yves Angelo explique ainsi sa méthode de travail : *la Gamma Box, qui permet de faire les différentes courbes sur l'image, est l'équivalent du choix d'une pellicule. On règle son gamma soi-même par logiciel. C'est un confort de travail extrêmement agréable. On aurait pu le faire à l'étalonnage. Sauf que là, la lumière est réglée en fonction de ce gamma, l'image se rapprochant au plus près de ce qu'elle sera au final.*⁶⁵

⁶² Sophie Bosquillon, *Le deuxième souffle, une reprise en Genesis*, Sonovision Digital Film, Supplément au Sonovision Broadcast n°516, mars 2007, p. 43.

⁶³ Sophie Bosquillon, opus cité, p. 42.

⁶⁴ Sophie Bosquillon, opus cité, p. 43.

⁶⁵ Sophie Bosquillon, opus cité, p. 43.

Pour ce film, Yves Angelo disposait de trois LUTs d'affichage qu'il choisissait en fonction de la scène. En terme de méthodologie, la cassette HD-Cam SR était changée à chaque changement de LUT, pour que le laboratoire n'ait qu'à appliquer une LUT par cassette.

Pour régler son exposition, Yves Angelo se fie presque uniquement au moniteur Sony 24 pouces. Il utilise très peu l'oscilloscope, auquel il reproche son manque de discrimination dans les noirs (dû sans doute à son échelle linéaire) : *Si je travaillais à l'oscilloscope, sur les basses lumières je serais obligé de mettre plus de lumière que je ne veux en avoir. Si l'on me dit que l'oscilloscope est utile pour la suite du montage je trouve ça ridicule. Pour toutes les séquences de nuit, je sais que je suis en dehors des normes et des règles. Si je respecte les règles, l'image est hideuse. Je ne le regarde que pour les hautes lumières, si je suis vraiment très au-dessus, ou pour éliminer des lampes dans le champ ou des choses comme cela.*⁶⁶

Yves Angelo voit d'un mauvais œil l'avènement des écrans LCD, qui viennent peu à peu remplacer les moniteurs à tube : *Le moniteur à tube sur le plateau est indispensable, même s'il est fragile et sensible aux champs magnétiques qui le font dériver en colorimétrie. Je ne comprends pas que ce soit abandonné. Si j'avais un moniteur LCD, j'arrêteraient la vidéo immédiatement. On ne peut pas le régler correctement à la fois pour les basses lumières, les hautes lumières et les lumières moyennes. (...) Si l'on revient à une image de piètre qualité, il n'y a plus aucun intérêt à faire de la vidéo. Autant faire du film et ce sera très bien.*⁶⁷ A croire que le succès d'une technologie nouvelle n'est pas forcément synonyme de gain de qualité...

La caméra Genesis a quant à elle connu un franc succès depuis sa sortie fin 2004, surtout pour la possibilité qu'elle offre de travailler avec des optiques 35 mm. Panavision semble avoir parfaitement compris qu'il fallait donner à une caméra de cinéma une latitude d'exposition intéressante (10 diaphragmes). On est loin de la latitude de pose du 35 mm, mais cela ne semble pas un problème puisqu'on dispose d'outils de prévisualisation pour régler précisément l'exposition.

Le petit hic de cette caméra est qu'elle constitue tout de même un retour en arrière en terme d'ergonomie et de poids. Clin d'œil aux temps héroïques de l'avènement du parlant, le développement de la captation numérique est généralement synonyme de perte de légèreté. Bob Beitcher, PDG de Panavision, reconnaît qu'il s'agit pour l'instant d'une caméra un peu prototype : *Ces caméras vont évoluer. Le nom « Genesis » était parfait, parce qu'il représente notre première caméra de la génération des caméras numériques.*⁶⁸

Etudions à présent une autre caméra « prototype », celle du concurrent historique de Panavision, Arri. Ce constructeur a fait des choix de conception un peu plus risqués que ceux de la Genesis, que nous allons maintenant étudier.

⁶⁶ Sophie Bosquillon, *Le deuxième souffle, une reprise en Genesis*, Sonovision Digital Film, Supplément au Sonovision Broadcast n°516, mars 2007, p. 44.

⁶⁷ Sophie Bosquillon., opus cité, p. 44.

⁶⁸ Jay Holben, *Soyons Numériques ! Panavision dévoile son système de Caméra numérique Super 35*, American Cinematographer, Septembre 2004.

2.2.4. L'Arri D 20 et le Film Mode

Sortie à peu près en même temps que la Genesis, la Arri D20 n'a pas connu le succès foudroyant de cette dernière. Jusqu'ici, elle a plutôt été considérée comme un prototype, et n'a pas encore de long-métrages à son actif. En 2006, lors de la préparation d'Astérix aux jeux olympiques, elle avait subi un test comparatif avec la Genesis, dont cette dernière était sortie victorieuse. Etudions les avantages et les inconvénients de cette caméra qui a le mérite d'avoir fait des choix technologiques novateurs.



La D20 et son look très « cinéma ». ⁶⁹

2.2.4.1. Caractéristiques de l'Arri D20

Le choix d'un capteur CMOS

La D20 est la seule caméra « D-Cinéma » à être équipée d'un capteur CMOS. Ce type de capteur est aujourd'hui très employé dans les appareils photos reflex numériques, mais peine encore à s'imposer au cinéma.

Le capteur de la D20 a un format de 24,9 x 18,15 mm, ce qui signifie qu'il a la largeur d'une image super-35 mm, avec un ratio de 1.37. La caméra est donc compatible avec les optiques 35mm, en monture PL.

Comme pour la Genesis, le choix d'un capteur de grande taille va permettre des pixels plus larges, et donc une dynamique étendue. Arri indique une largeur de 8,25 microns par pixel, contre 4,9 microns pour un capteur standard 2/3". La dynamique annoncée est d'au moins 10 diaphragmes.

On peut faire à ce capteur un reproche souvent adressé aux CMOS : son relative manque de sensibilité. La D20 a un indice d'exposition d'environ 100, qui varie un peu suivant la courbe de transfert utilisée, mais reste nettement inférieur à celui des autres caméras D-Cinéma. C'est une des raisons pour laquelle les chefs opérateurs lui préfèrent la Genesis.

Si Arri a fait le choix d'un capteur CMOS, c'est en grande partie pour permettre des vitesses de prises de vue élevées, qui constituent un des avantages des CMOS. Le constructeur indique que le capteur de la caméra a la capacité de produire jusqu'à 150 images par seconde. Malheureusement, il n'existe pas encore de support d'enregistrement pour le cinéma supportant de tels débits. La possibilité d'enregistrement des vitesses variables de la D20 va de 1 à 60 images par seconde. L'enregistrement des vitesses comprises entre 30 et 60 images par seconde se faisant en 4:2:2 pour limiter le débit.

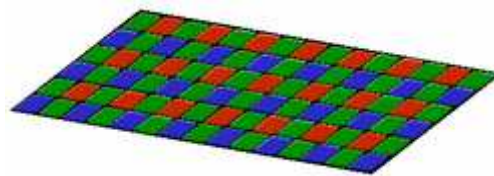
⁶⁹ Source : [www.bogard.fr]

Un Filtre de Bayer

Le capteur a une résolution native de 3018 x 2200 pixels et un ratio de 1.37.

Pour permettre l'analyse trichrome, il est équipé d'un filtre de Bayer, sur le mode des appareils photos numériques.

Le principe de la matrice de Bayer est de recouvrir alternativement les pixels de filtres rouge, vert et bleu. La couleur verte participant à 60% de la luminance, on choisit d'utiliser deux fois plus de filtres verts.



Principe du filtre de Bayer ⁷⁰

Pour obtenir les données R,V,B de chaque pixel, on réalise une « interpolation ». Au moyen d'algorithmes, on calcule les informations de couleurs manquantes pour chaque pixel. Si on prend l'exemple d'un pixel filtré en rouge, ses informations manquantes de vert et de bleu seront calculées à partir des pixels verts et bleus voisins.

Comment évaluer la définition équivalente obtenue après interpolation ? Pour Arri : *Avec son capteur de 6 millions de pixels, la caméra a une résolution équivalente à une caméra équipée de 3 capteurs de 3 millions de pixels chacun.* ⁷¹

Déduisons de cette information les résolutions équivalentes enregistrées par la caméra dans ses différents modes. La D20 propose en effet deux modes d'enregistrement : le « Video Mode » et le « Film Mode », qui n'utilisent pas la même définition du capteur.

- **le Film Mode** utilise la résolution pleine du capteur 3018 x 2200 = 6 millions de pixels. Le principe de ce mode est que l'interpolation ne se fait pas dans la caméra, mais en post-production. Selon Arri, la résolution « interpolée » obtenue serait donc approximativement de 3 millions de pixels par couleur, soit une image 2K de 2048 x 1494 pixels. Un des intérêt du Film Mode serait donc d'obtenir une image 2K, qui constitue un standard de post-production numérique. Ce format est légèrement supérieur en définition au format HDTV 1920 x 1080.

- **le Vidéo Mode** utilise « seulement » 2880 x 1620 = 4,7 millions de pixels, avec un ratio de 1.77. L'enregistrement s'effectue au standard HDTV 1920 x 1080 = 2 millions de pixels. On garde donc bien un rapport d'à peu près 2 entre la définition réelle du capteur et la définition interpolée.

⁷⁰ *Capteur Photographique*, in [<http://fr.wikipedia.org/wiki/>]

⁷¹ Hermann Popp, [hpopp@arri.de], *Arri Technology Project D-20 : Digital Film-Style Camera for TV-Oriented Applications*, Arri White Paper, in [www.arri.de], 2003, p.4.

« *The resolution of the camera with its 6 megapixel sensor corresponds to a 3 sensor camera with 3 megapixel sensors.* »

Une visée optique

En termes d'ergonomie, Arri a conçu la D20 sur le modèle de ses caméras film. La plupart des accessoires Arri sont donc compatibles avec la caméra.

Le « must » pour les chefs opérateurs est sa visée optique reflex, qui permet enfin de bénéficier d'une réserve de cadre en prise de vue numérique. Ce qui n'est pas le cas de la Genesis, rappelons-le. Cette visée optique donne une appréciation de la lumière et du point beaucoup plus précise qu'une visée électronique. Elle répond ainsi à une demande répétée de la part des opérateurs auprès des constructeurs de caméras numériques.

La visée reflex exige bien sûr un obturateur mécanique, qui est variable de 11,2° à 180°. On ne peut dans ce cas bénéficier d'une obturation à 360°, comme pour les caméras vidéos à obturateur électronique.

Petit hic, du fait de cette visée optique, l'image se forme soit sur le dépoli, soit sur le capteur. Donc lorsque la caméra est à l'arrêt, on doit choisir entre voir l'image dans la visée, ou sur le moniteur relié à la sortie HD-SDI de la caméra. Pour remédier à cette situation un peu absurde, Arri a carrément proposé d'adjoindre au bloc de visée une visée vidéo de caméra film. Dommage pour la qualité du retour vidéo... La solution généralement adoptée est de faire tourner la caméra quand on veut obtenir une image à la fois dans le viseur et sur le moniteur.

Un petit couac qui dit en dit long sur les difficultés de transférer la logique film en vidéo...

En ce qui concerne le poids de la caméra, on est dans les limites du raisonnable : 7 kg pour le corps caméra. Autre avantage : la caméra consomme beaucoup moins d'énergie qu'une caméra à capteur CCD comme la Genesis, grâce à la faible consommation de son capteur CMOS. Le capteur quant à lui est protégé par un filtre passe-bas en sa surface, qui comporte une couche antistatique et anti-réflexion.

Arri est encore novateur sur un point. Le constructeur fait de la D20 une caméra modulaire, en prévoyant de changer les différentes parties de la caméra au fur et à mesure des avancées technologiques. Par exemple, le capteur CMOS pourra un jour être changé pour un capteur plus sensible. On est très loin de la philosophie « jetable » de la plupart des caméras vidéos...

2.2.4.2. Mode Film et Mode Vidéo

Arri propose plusieurs modes d'enregistrement pour sa caméra, qui reprennent les différentes approches des constructeurs pour préserver la latitude d'exposition.

Tout d'abord, l'échantillonnage en sortie de capteur se fait sur 14 bits, comme pour la Genesis. Arri nous donne ensuite le choix d'enregistrer sur 10 ou 12 bits. Notons que c'est la première fois que l'on parle d'un enregistrement sur 12 bits pour les caméras D-Cinéma, et qu'il doit logiquement générer un débit énorme. Nous verrons quelle astuce Arri utilise pour permettre cet enregistrement.

Le constructeur propose deux modes de travail, correspondant au choix entre 10 et 12 bits : le « Vidéo Mode » et le « Film Mode ».

Le « Vidéo Mode »

L'enregistrement se fait sur 10 bits, comme pour la Genesis et la Viper.

On dispose dans ce mode des mêmes supports d'enregistrement que pour la Viper : magnétoscope séparé HD-Cam SR.

enregistreur séparé à disque dur, type S.two.

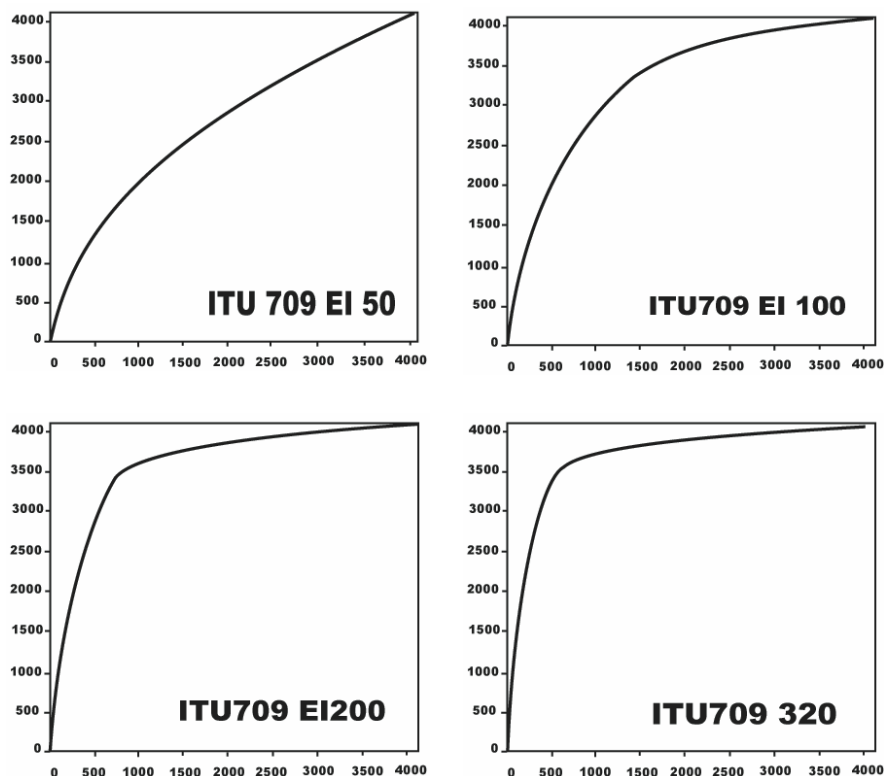
magasin à mémoire Flash « Arri Flash Mag ». Il s'agit en fait du Venom de la Viper, Arri ayant conclu un accord avec Thomson Grass Valley pour l'utiliser.

Dans ce mode 10 bits, Arri propose différentes courbes de transfert à appliquer au signal, qui reprennent les différentes philosophies de l'enregistrement en vidéo.

Courbes de gamma

La première série de courbes proposées permet un enregistrement vidéo classique, un peu sur le mode des courbes HyperGammas. Ces courbes sont basées sur la norme ITU709.

Pour augmenter la sensibilité de la caméra, Arri décline ces courbes de gamma avec un contraste plus ou moins fort, compensé par plus ou moins de compression dans les blancs.



Courbes de gamma ITU709 proposées dans le menu de l'Arri D20 ⁷²

Voici comment le constructeur présente ces courbes :

ITU709 EI 50 : Permet une latitude de 3 diaphragmes au-dessus du 18%, et 7 en dessous.

ITU709 EI 100 : Permet une latitude de 4 Ø au-dessus du 18%, et 6 en dessous.

ITU709 EI 200 : Permet une latitude de 5 Ø au-dessus du 18%, et 5 en dessous.

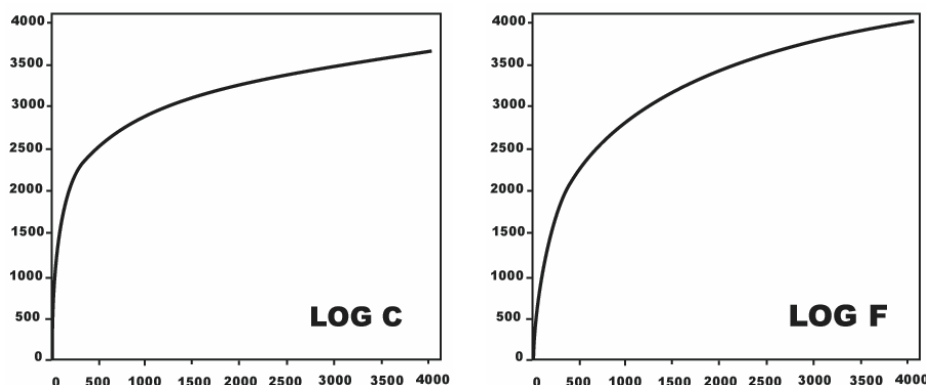
ITU709 EI 320 : Permet une latitude de 6 Ø au-dessus du 18%, et 4 en dessous.

On voit que c'est une façon pour le moins artificielle d'augmenter la sensibilité de la caméra, en jouant sur le contraste de l'image, qu'on tempère par une compression extrême des blancs. On est en plein dans la logique vidéo inversible, puisque ces courbes ne favorisent évidemment pas les possibilités d'étalonnage.

⁷² Source : *Camera Configuration – Training Documentation*, Arri, 2006, p. 6.

Courbes de transfert 10 bits log

Un autre mode d'enregistrement proposé s'apparente plutôt aux courbes de transfert Panalog de la Genesis et FilmStream de la Viper. Arri donne le choix entre deux courbes qui convertissent les données issues de la caméra au format 10 bits log.



Courbes de transfert en au format 10 bits log ⁷³

Pour ces courbes, Arri donne un indice d'exposition de 80.

La courbe « log C » est la transcription du format Cineon.

La courbe « log F » reprend la courbe FilmStream de la Viper.

On retrouve ici la philosophie d'enregistrement d'une image intermédiaire, « négative », qui nous est chère.

En plus de proposer ce mode 10 bits log comme le font ses concurrents, Arri propose avec le « Film Mode » une méthode d'enregistrement inspirée de la photographie numérique professionnelle.

le « Film Mode »

L'enregistrement se fait sur 12 bits, en mode « RAW data ». Comme en photographie numérique, le mode RAW consiste à enregistrer les données non interpolées issues du capteur. Cela permet de réduire fortement le débit, qui est 3 fois moindre qu'un débit classique RVB. L'interpolation est réalisée en post-production, avec des outils encore plus puissants que ne le permettrait la caméra. Ce mode permet d'améliorer à la fois la profondeur d'échantillonnage et l'interpolation, tout en conservant un débit d'enregistrement acceptable.

Ce mode était prévu au départ pour être codé en linéaire, mais Arri serait en train de lui adjoindre l'option d'enregistrer en 12 bits log, ce qui permettrait de tirer pleinement parti du codage sur 12 bits.

Dans ce mode, les supports d'enregistrement sont réduits au Arri Flash Mag et à l'enregistrement sur disque dur, l'enregistrement en HD-Cam SR n'étant plus possible, puisqu'il fonctionne sur 10 bits.

⁷³ Source : *Camera Configuration – Training Documentation*, Arri, 2006, p. 6.

En ce qui concerne l'affichage de l'image durant le tournage, Arri aurait l'intention de sortir fin 2007 des LUT d'affichage à intégrer à la caméra.

Pour l'instant, les LUTs sont intégrées par les loueurs au niveau du moniteur ou de l'enregistreur à disque dur.

Pour faire un bilan sur l'Arri D20, on peut dire que c'est une caméra qui a su adapter certaines techniques de la photographie numérique dans le champ du cinéma. Elle propose ainsi un mode d'enregistrement en « RAW Data » qui concilie réduction de débit et amélioration de la profondeur d'échantillonnage. Elle est par contre un peu victime du retard des capteurs CMOS en terme de sensibilité, ce qui risque de l'handicaper pour être choisie en long-métrage.

Etudions à présent une ultime caméra D-Cinéma, elle aussi très inspirée par les techniques de la photo numérique, ayant la réputation d'avoir une latitude d'exposition incroyable : l'Origin de Dalsa.

2.2.5. La Dalsa Origin et le Mode « Raw »

Si l'on excepte son ergonomie, la caméra « Origin » de la société Dalsa semble être le prototype de ce que sera la caméra numérique dans le futur.

Basé au Canada, Dalsa est le leader mondial de la fabrication de grands capteurs pour l'industrie, fournisseur notamment de la Nasa. La société conçoit également des dos numériques pour les appareils photos moyen format.



La Dalsa Origin expliquée de façon pédagogique... ⁷⁴

En 2006, ils ont été les premiers à fabriquer un capteur de plus de 100 millions de pixels. De 4 pouces de largeur, ce capteur a été développé pour le département astronomie de l'observatoire naval américain.

Depuis l'année 2004, la caméra Origin est dans une phase de fin de prototype, c'est-à-dire que Dalsa la teste auprès des opérateurs cinéma. Pour cela, Dalsa a racheté un loueur de caméras films à Los Angeles, ce qui lui permet d'échanger avec les opérateurs sur les améliorations à apporter à la caméra. Dalsa prépare actuellement une caméra baptisée « Evolution », qui est une version revue et corrigée de l'Origin. Elle est prévue pour le début de l'année 2008...

2.2.5.1. Des caractéristiques remarquables

Si l'on examine une à une les caractéristiques de l'Origin, on remarque qu'elles se situent toutes un cran au-dessus des autres caméras D-Cinéma. En terme de latitude d'exposition particulièrement, l'Origin est une caméra fascinante, car elle semble se rapprocher du niveau de la captation argentique.

Le capteur de la Dalsa est un CCD « Frame Transfert » proche de la taille du super-35. Le choix du transfert FT permet de consacrer toute la surface du capteur à la conversion opto-électrique. Dalsa annonce une largeur de pixels de 8,4 microns, ce qui est proche de celle que nous avons relevée pour la D20 (8,25 microns). Refroidi par effet Peltier, ce capteur hautement performant offre une dynamique de plus de 12 diaphragmes et une sensibilité d'environ 320 ASA. Pour traiter cette dynamique, l'échantillonnage se fait sur 16 bits.

Tout comme la D20 et la Genesis, l'Origin est équipée d'une monture PL et peut recevoir des optiques 35 mm.

⁷⁴ Control Interface in [www.dalsa.com], 2007.

Le capteur a une résolution de 4046 x 2048 pixels, ce qui correspond en largeur au format de post-production 4K. Son ratio est de 2:1.

Comme celui de la D20, le capteur est équipé d'un filtre de Bayer pour permettre l'analyse trichrome. La définition interpolée obtenue serait en théorie plutôt comprise entre du 4K et du 2K. Dalsa annonce tout de même l'Origin comme une caméra 4K... Seuls 4000 x 2048 pixels sont actifs, ce qui donne un ratio d'image de 1,96 :1. Les autres servant de référence pour l'interpolation du signal.

2.2.5.2. Le Mode « Raw »

Selon Dalsa, les données issues du filtre de Bayer sont en fait un « négatif numérique » du matériel original.⁷⁵

L'Origin propose un enregistrement record en 16 bits linéaires. Pour conserver toutefois un débit acceptable, Dalsa propose d'enregistrer en mode RAW, ce qui permet un débit 3 fois moindre à celui des données RVB. A 24 images par seconde, le débit en mode RAW est de 402 Mo/s, contre 1208 Mo/s en mode RVB. Les images sont codées en fichiers DPX.

Un autre avantage de réaliser l'interpolation des données RVB en post-production est qu'elle pourra se faire avec des outils de calcul plus puissants. On peut choisir de post-produire les données de la caméra en 2K ou en 4K, la filière 4K étant encore un peu gourmande en puissance de stockage.

Malgré l'utilisation du mode RAW, les débits générés restent énormes, et le signal de la caméra est transféré vers un enregistreur à disque dur au moyen de quatre fibres optiques regroupées à l'intérieur d'un même câble.

Pour gagner en autonomie de caméra, Dalsa prévoit de sortir en même temps que la caméra Evolution un « Flashmag » qui aura une capacité de 20 min pour des données non-compressées, et 40 min dans un mode de compression sans perte.

Ce magasin numérique contiendra un module d'interpolation qui permettra de relire sur un moniteur les données RVB, en « super-2K » via un double HD-SDI.

⁷⁵ *Origin Outputs* in [www.dalsa.com], 2007.

« *The Bayer-pattern data is in effect a « digital negative » of the original material.* »

2.2.5.3. Vers « l'Evolution »

Pour contenter les opérateurs film, Dalsa fournit sa caméra avec une visée optique reflex. Celle de l'Origin avait le défaut d'être trop haute pour une utilisation de la caméra à l'épaule, mais Dalsa revoit ses cotes pour le future modèle Evolution. Cette visée optique va bien sûr de pair avec un obturateur mécanique, qui est variable de 45° à 200°. Les cadences d'image supportées par la caméra vont de 1 à 36 images.

Un autre intérêt de l'obturateur mécanique est qu'il rend le capteur inaccessible lorsque la caméra est à l'arrêt, ce qui assure sa protection.

La caméra Origin avait été conçue au départ sans vraiment prévoir de possibilité d'affichage sur un moniteur. Le constructeur pensait que les chefs opérateurs se serviraient tout simplement de leur cellule, comme en 35 mm. Dans la version Evolution une sortie HD-SDI a été intégrée pour permettre l'affichage sur un moniteur, associée à 24 LUTs d'affichage.

L'ultime amélioration de l'Evolution sera une ergonomie un peu plus « cinéma », et un poids revu à la baisse. L'Origin pesait tout de même 14,5 kg.

Si elle est encore à l'état de prototype, l'Origin de Dalsa est une caméra qui annonce le futur de la captation numérique. Futur proche dans lequel les problèmes de latitude d'exposition ne seront sans doute qu'un lointain souvenir. Faisons un peu de prospective en faisant des hypothèses sur les possibilités d'amélioration futures de la latitude d'exposition en captation numérique.

2.3. A l'avenir

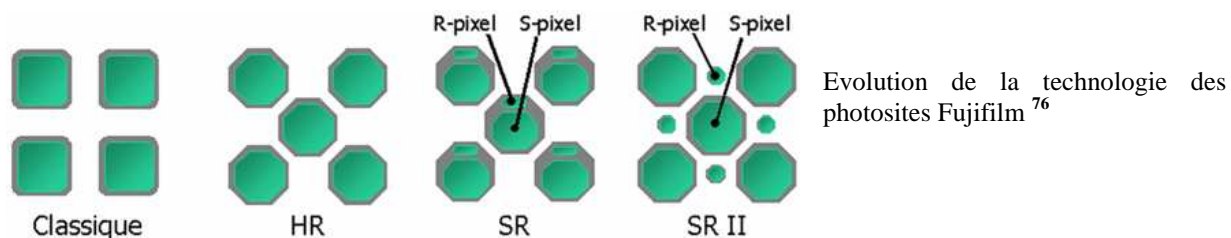
Au fil de ces pages, nous sommes peu à peu arrivés à la conclusion que la latitude d'exposition de nos caméras D-Cinéma dépendait essentiellement de la capacité de stockage des puits à électrons du capteur. Au fur et à mesure de l'amélioration de la dynamique des capteurs, les industriels ont augmenté la profondeur d'échantillonnage, en trouvant des méthodes de réduction de débit qui conservait la dynamique de l'image. C'est l'intérêt des formats codés sur 10 bits log et des formats RAW. L'amélioration des capteurs et l'augmentation des capacités d'enregistrement devront donc s'effectuer en parallèle.

Il y a fort à parier que le cinéma numérique gagnera à s'inspirer des technologies de la photographie numérique professionnelle, comme il a déjà su le faire.

Des propositions sont faites constamment en photographie pour essayer d'améliorer la dynamique des capteurs. Prenons l'exemple de Fujifilm, qui a proposé ces dernières années des technologies novatrices, qui rappellent le principe d'une émulsion négative argentique.

Les « Super-CCD » de Fujifilm

Tout d'abord, avec la technologie « Super-CCD HR », le constructeur avait décidé de donner à ses photosites une surface orthogonale et non plus carrée, ce qui permettait d'améliorer la résolution en imbriquant les pixels les uns dans les autres.

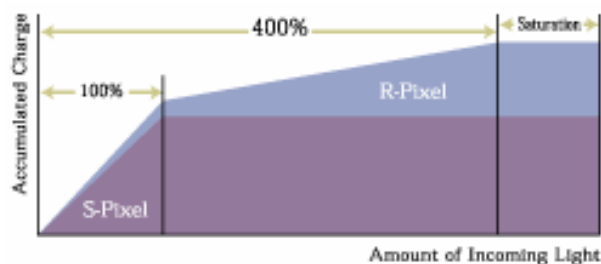


En 2004, avec la technologie SR, Fujifilm décide de dédoubler chaque photosite : un élément de grande taille "S", de haute sensibilité, enregistre l'information principale. - un élément plus petit "R", de basse sensibilité, enregistre les valeurs de luminance des très hautes lumières.

Selon le constructeur, cette technologie permet d'étendre la dynamique de 100% à 400%, ce qui revient à gagner 2 diaphragmes.

La deuxième génération de ce type de photosite, baptisée SR II, disperse les photosites un peu à la façon des grains d'une pellicule.

Le fait de faire appel à des photosites de différentes tailles, et par conséquent de sensibilité différente, rappelle un peu le principe de l'émulsion argentique, qui comporte des grains de différentes taille pour augmenter sa latitude d'exposition.



Principe des photosites SR ⁷⁷

Autant de propositions plutôt prometteuses, qui s'appliqueront peut-être un jour au champ du cinéma.

⁷⁶ Illustration *CCD Sensor Layout Evolution*, in *Capteur Photographique*, in [<http://fr.wikipedia.org/wiki>], 2005.

⁷⁷ *Expanded Dynamix Range and Image Strcture*, in *FinePix S5 Pro – Présentation*, In [www.fujifilm.fr], 2007.

A l'heure des bilans, il est heureux de pouvoir dire que le manque de latitude d'exposition que nous déplorions chez certaines caméras numériques n'est pas une malédiction qui pèserait sur la prise de vue numérique en général...

Pour pouvoir justifier ou non le parallèle qui s'imposait entre les rendus de l'image vidéo et de la pellicule inversible, nous avons étudié le principe de chacune de ces technologies de prise de vue.

Avec la chaîne argentique, nous avons compris l'intérêt du système négatif-positif qui permet de diviser en deux étapes la reproduction d'une image cinématographique. Dans un premier temps, la pellicule négative faiblement contrastée permet de capter l'écart de contraste du sujet, en enregistrant nombres de nuances dans les noirs et les blancs. La pellicule positive quant à elle a pour rôle de proposer à l'œil du spectateur un contraste élevé, flatteur pour l'image de cinéma.

Nous avons ensuite étudié le cas de la prise de vue inversible, et déterminé que ce mode de prise de vue ne permettait pas une bonne reproduction des noirs et les blancs, tout écart de contraste un peu fort se traduisant par des zones bouchées ou des aplats blancs.

Fort de ces constatations, nous nous sommes demandés si le fait que le signal vidéo se doit d'être directement affichable, à la manière d'un inversible, était la cause de son manque de latitude d'exposition.

Nous avons alors relevé les contraintes qui pesaient sur le latitude d'exposition en prise de vue numérique. Nous avons constaté que la dynamique du capteur était comprise entre un niveau de bruit et un niveau de saturation, qui résultaient de la conception même du capteur. Le niveau de qualité du capteur était donc un premier facteur déterminant de la dynamique. Nous avons ensuite étudié les traitements imposés à l'image en vidéo traditionnelle. Nous y avons retrouvé les principes de la prise de vue inversible, facilité par les possibilités d'affichage et de réglages des menus disponibles en vidéo. Cette logique d'enregistrement, en limitant les possibilités d'étalonnage, n'est évidemment pas adaptée à la prise de vue cinématographique.

Nous allons voulu savoir si le rôle que remplissait le négatif dans la prise de vue argentique pouvait trouver un équivalent en captation numérique. A travers l'étude des caméras hautes définitions présentes actuellement sur le marché de la location en France,

nous avons remarqué qu'on s'orientait de plus en plus vers la volonté de disposer d'une latitude d'exposition la plus large possible en captation. Pour atteindre ce but, les constructeurs ont fait appel à des techniques variées, souvent amalgamées sous la même appellation « Mode Film ».

Les constructeurs de caméras héritières de la tradition vidéo ont par exemple cherché à agir sur la courbe de gamma pour bénéficier d'un contraste plus faible en captation.

Une deuxième proposition de la part des constructeurs de caméras dédiées au cinéma a été d'ajuster le pas d'échantillonnage à la réponse de notre œil. C'est le principe des courbes de transfert logarithmiques.

Enfin, s'inspirant de la photographie professionnelle numérique, certains ont décidé d'appliquer le mode RAW au cinéma.

On obtient aujourd'hui des caméras D-Cinéma qui ont au moins 10 diaphragmes de latitude d'exposition, ce qui commence à être confortable pour la prise de vue cinématographique. Par contre, le concept de latitude de pose n'est pas encore utilisé en prise de vue numérique, comme il peut l'être en argentique. Seul le cinéaste Michael Mann fait une utilisation du rapport signal sur bruit qui s'apparente en quelque sorte à ce type de recherche...

Pour essayer de vérifier les conclusions théoriques de ce mémoire, nous avons réalisé un essai de Key Light comparatif entre une pellicule négative et des caméras numériques de conceptions différentes. Le but était de déterminer sur quel type de caméras numériques la latitude d'exposition pouvait être un facteur limitatif, et surtout d'étudier les possibilités de latitude de pose offertes par ces nouvelles caméras. Nous expliquons la méthode entreprise en annexe.

Annexe : Présentation de la Partie Pratique de Mémoire

Keylights comparés de caméras D-Cinéma avec une pellicule négative.

Le but de cette partie pratique était de mettre en image les différentes hypothèses avancées dans ce mémoire, sur l'influence de la latitude d'exposition sur le rendu de la prise de vue.

Choix de l'essai de Key Light

Dès que l'on tente de comparer prises de vue argentique et numérique, on se heurte aux différences de logique des technologies employées, qui par exemple n'utilisent pas les mêmes échelles pour représenter la réponse du capteur en fonction de la lumière.

En discutant avec Thierry Beaumel, responsable de post-production au Laboratoire Eclair Numérique, nous sommes tombés d'accord sur le fait que l'essai de Keylight était un des rares dénominateurs commun pour comparer captations argentiques et numériques.

Il a accepté de financer la post-production des essais de Keylight que je voulais réaliser. J'avais l'intention de comparer les Keylight d'une pellicule 35 mm avec ceux des caméras D-Cinéma que les loueurs voudraient bien mettre à ma disposition.

L'essai de key light est habituellement utilisé par le chef opérateur pour tester les possibilités de sur et sous-exposition d'une pellicule argentique.

Pour mettre en place le protocole d'essai, je me suis basée sur *les Recommandations pratiques aux directeurs de la photo lors des essais de « Keylight »* fournies par la CST.⁷⁸

Dans un éclairage uniforme, j'ai placé un visage féminin, un gris à 18%, une charte de gris, une charte blanche Macbeth et une charte de couleur Macbeth.

La charte de couleur Macbeth m'avait été recommandée par Thierry Beaumel, car elle constitue une référence habituelle pour la chaîne de reproduction numérique.

⁷⁸ Groupe de Travail Sensitométrie, *Sensitométrie appliquée à la Prise de Vues et au Traitement en Laboratoires des Films cinématographiques*, Edition CST/Sonovision, Paris, 2000.

Le fond était constitué par un tissu de velours noir non éclairé, devant figurer la densité maximum et servir à déterminer la réaction des noirs en qualité et en colorimétrie.



Je réalisais un décalage d'un demi-diaphragme entre chaque plan.

Photogramme tiré du télécinéma de l'essai de Keylight de la 5218.

La Chaîne de post-production

Nous avons choisi comme support final pour la diffusion de ces essais un master de cinéma numérique encodé en JPEG 2000. Ce choix nous permettait d'étudier le rendu de la nouvelle chaîne de cinéma numérique qui est en train de voir le jour.

Nous voulions essayer de préserver tout au long de la chaîne image la latitude d'exposition étudiée. Il nous fallait dans la mesure du possible tester les caméras dans le format qui fournissait la latitude d'exposition la plus élevée.

Pour préserver la latitude d'exposition de la négative 35 mm, le transfert en numérique s'est fait par l'intermédiaire d'un scanner, et non d'un télécinéma. Le format obtenu était un format Cineon 10 bits log.

Les Conditions des essais

Les caméras numériques que j'ai pu tester sont la Viper, la Arri D20, et la Panasonic HVX200.

Keylight 35 mm

Pour ce test en 35 mm qui devait nous servir de référence, j'ai choisi la pellicule 5218, qui est actuellement la plus utilisée par les chefs opérateurs, même dans le cas d'une post-production numérique.

Pour cet essai, j'ai testé une latitude d'exposition très large, car je voulais déterminer ce qui restait de cette latitude après l'étape du scan. J'ai donc effectué un ramping allant de - 6 à + 7 diaphragmes.

Eclair m'a fourni un télécinéma des rushes pour réaliser le montage, et j'ai alors réalisé combien le télécinéma fournissait peu de latitude de reproduction image, pas plus de 5 diaphragmes...

Une citation de Joe Matza, président du laboratoire numérique Efilm de Los Angeles, illustre bien ce problème : *Dès que vous touchez à une manette dans un télécinéma, vous perdez la dynamique.*⁷⁹

Keylight de l'Arri D20

Je n'ai pas pu tester cette caméra dans son « Film Mode », car le loueur Bogard ne disposait pas au moment des tests de son Arri Flash Mag.

Je ne pouvais enregistrer que sur un magnétoscope HD-Cam SRW1 en 10 bits. J'ai utilisé la courbe log F, qui correspond à la courbe FilmStream de la Viper. Selon Joël Porcu, responsable HD de Bogard, elle est celle qui offre le plus de latitude d'exposition. J'ai enregistré en mode Standard avec un taux de compression de 4,2:1.

J'ai utilisé la caméra pour un indice d'exposition de 100, ce qui a nécessité un apport important de lumière.

En me fiant à l'oscilloscope du moniteur Astro, j'ai trouvé une latitude d'exposition de l'ordre de 10 diaphragmes avec à peu près 4 diaphragmes en surexposition et 6 en sous-exposition.

En terme d'ergonomie, ce qui est un peu surprenant avec le principe d'un enregistreur externe, c'est qu'on ne dispose plus de bouton on/off à l'avant de la caméra. On doit déclencher sur la télécommande du SRW1, qui se fixe à l'arrière ou sur le côté de la caméra.



Keylight de la Viper

L'enregistrement du Keylight de la Viper s'est fait en mode FilmStream, sur le DFR de S.Two. J'ai trouvé une latitude d'exposition très confortable à la Viper, de l'ordre de 12 diaphragmes, allant de + 5 1/2 en surexposition à - 6 1/2 en sous-exposition. J'ai été agréablement surprise par la légèreté de la caméra, mais un peu gênée par le viseur vidéo noir et blanc (qui peut être changé pour un viseur couleur).

Keylight de la Panasonic HVX 200

Cette petite caméra fait un peu figure d'outsider, car elle possède un capteur d'1/3 de pouces. Elle enregistre néanmoins en DVC Pro HD, et possède une courbe de gamma baptisée « Cine-like D ». Cela m'intéressait de comparer les possibilités de cette caméra à petit capteur avec les deux autres caméras D-Cinéma.

En toute logique, je lui ai trouvé une latitude d'exposition de l'ordre de 8 diaphragmes.

⁷⁹ Entretien avec Benjamin B, *L'avenir de la couleur*, Lumières n°2, les cahiers AFC, 2006, p.87.

Le Montage

Ces essais vont être montés de la façon suivante.

La première partie du montage sera un étalonnage à lumière unique. Nous verrons les valeurs d'exposition allant de -4 à $+4$ pour chaque caméra. Cet essai vise à déterminer le rendu des hautes et des basses lumières sur un visage. Il permettra d'évaluer la latitude de reproduction image obtenue pour chaque caméra.

La deuxième partie du montage permettra une étude de la latitude de pose, avec un étalonnage plan par plan des valeurs allant de -5 à $+4$. Elle permettra d'étudier le rendu des plans surexposés et sous-exposés, et de visualiser l'influence du grain, du bruit, des balances colorimétriques dans les hautes et les basses lumières.

Conclusion

Je ne peux encore totalement conclure sur ces Keylight, car je n'ai pas encore vu l'étalonnage final. En ce qui concerne la latitude d'exposition relevée lors des essais, je peux faire plusieurs remarques.

La Viper a une latitude d'exposition très intéressante de l'ordre de 12 diaphragmes, qui se rapproche de celle du film. Néanmoins, nous n'avons pas utilisé de filtres magenta pour la prise de vue. A cause du décalage de sensibilité entre ses capteurs, il faut s'attendre à voir apparaître des dominantes magenta dans les hautes et les basses lumières, ce qui d'après Thomson ramène la latitude d'exposition utilisable à 10 diaphragmes. Nous verrons ce qu'il en est.

La Arri D20 a une latitude d'environ 10 diaphragmes, qui est donc assez inférieure à celle de la Viper. Les deux caméras ayant été utilisées avec la même courbe FilmStream, c'est donc la dynamique du capteur qui limite la latitude d'exposition de la D20.

La petite Panasonic HVX 200, avec ses 8 diaphragmes de latitude, amène des contraintes proches de la prise de vue inversible. Ces 8 diaphragmes ne sont tout de même pas si mal, quand on sait que certaines caméras vidéo descendent à 6 diaphragmes de latitude....

En guise de conclusion...

Je sors plutôt rassurée de ce mémoire de recherche, rassurée sur les potentiels de latitude d'exposition en prise de vue numérique. L'arrivée de ce nouveau mode de captation amènera sûrement au début quelques retours en arrière en terme d'ergonomie et de maniabilité. Mais je suis convaincue à présent que la prise de vue numérique a le potentiel d'ici quelques années de fournir une image qui aura une qualité équivalente à celle du 35 mm.

Je pense toutefois que tourner en numérique exige certaines précautions dans les hautes lumières, et de façon plus aigue avec l'avènement de la projection numérique. En effet, contrairement à ce qui se passe en argentique, le signal issu des caméras D-Cinéma ne subit généralement aucune compression des blancs. Dans la chaîne de post-production actuelle, ces images sont ensuite transférées en argentique, pour permettre la projection. On peut considérer qu'une compression des hautes lumières s'effectue à ce moment là, induite par la réponse des courbes argentiques. Par contre dans le cas où la captation et la projection s'effectuent en numérique, aucune compression des blancs n'apparaît naturellement dans la chaîne. Or j'ai l'impression que cette compression est nécessaire pour donner un rendu qui semble naturel à notre œil. Je pense qu'opérer une compression des blancs lors de l'étalonnage numérique est sans doute nécessaire. Autant de points sur lesquels il me faut continuer à faire des recherches....

Bibliographie

Ouvrages

Ricardo Aronovich

Exposer une histoire, Editions Dujarric, Paris, 2003.

Philippe Bellaïche

Les Secrets de l'Image Vidéo, Sixième Edition, Editions Eyrolles, Paris, 2006.

Hervé Bernard, avec la contribution de François Helt et de Matthieu Sintas

L'Image Numérique et le Cinéma, un Pont entre l'Argentique et le Numérique, Editions Eyrolles, Paris, 2000.

René Bouillot

Cours de Photographie Numérique : Principes, Acquisition et Stockage, Edition Dunod, Paris, 2003.

Hans Breuer

Atlas de la Physique, Edition Le Livre de Poche, Collection Encyclopédies d'aujourd'hui, Paris, 1997.

Jean-Charles Fouché et Léonard Rollin

La Pratique de la HD, Edition Baie des Anges, Paris, 2006.

Jean-Louis Fournier

La Sensitométrie : les Sciences de l'Image appliquées à la Prise de Vues Cinématographiques, Editions Dujarric, Paris, 2006.

Aude Humblet

Télécinéma et Etalonnage, Edition Les Cahiers du Cinéma/CST, Paris 2000.

André Marion

Acquisition et Visualisation des Images, Editions Eyrolles, Paris, 1997.

François Reumont

Le Guide Image de la Prise de vues cinéma, Editions Dujarric, Paris, 2006.

Groupe de Travail Sensitométrie

Sensitométrie appliquée à la Prise de Vues et au Traitement en Laboratoires des Films cinématographiques, Edition CST/Sonovision, Paris, 2000.

Articles

François Reumont, *Deux frères, une nouvelle étape vers la haute définition*, Interview de Jean-Marie Dreujou, *Technicien du Film* n° 543, Avril 2004.

François REUMONT, *Opérateur de la vision, un métier d'avenir*, Interview d'Olivier Garcia, *Technicien du Film* n° 543, Avril 2004, p. 26.

Benjamin Bergery, *Reflections : Two Brothers*, *American Cinematographer*, septembre 2004, in [www.theasc.com], site de , .

François Reumont *Les HyperGamma dopent la prise de vues HD*, *Technicien du Film* n° 550, Décembre 2004, p.7.

Robin Rowe, *Superman returns in super HD*, *HD Magazine*, Mai 2006, p.14, in [www.definitionmagazine.com].

Jay Holbern, *Hell on Wheels*, *American Cinematographer*, Août 2004, in [www.theasc.com].

Matthieu Sintas, *Le Gamma en vidéo*, *Dossier Technique* n°1, Edition CST, in [www.cst.fr], novembre 1997.

Harald Brendel, [hbrendel@arri.de], *Arri Companion to DI*, Second Edition, in [arri.com], Septembre 2005.

Mémoires ENSLL

Thomas Collignon

La prise de vue en haute définition numérique, sous la direction de Francine Lévy et Vincent Muller, ENSLL, 2001.

Charlie Lenormand

Du grain au bruit : Vers une sensitométrie numérique ciné, sous la direction d'Alain Delhaise et de Philippe Valognes, ENSLL, 2006.

Remerciements

Thierry Beaumel & Eclair
Joël Porcu & Bogard
Matthieu Straub, Christophe Hustache, Steven Gruen & TSF
Philippe Valognes
Fabien Pisano
Franck Mougnot
Jean-François Robin
Jean-Yves Bruyas
Pierre Novion
Yves Angelo
Alain Sarlat
Jean-Louis Fournier
Véronique Lorin
Francine Levy
Jean-Pierre Thé
Alain Tanguy
Didier Nové
Roger Trivellin
Michel Coteret
Françoise Baranger
Martine Duvert
Nicole Demars
Taos Merad
David Morille
Romain Rabier
Adrien Onesto
Benjamin Roux
Charlie Lenormand
Anne Laforgue
Camille Aulnette
Natacha Aulnette

TABLE DES MATIERES

1. LE PROBLEME DE LA LATITUDE D'EXPOSITION AU CINEMA	4
1.1. CE QUE NOUS ENTENDONS PAR « LATITUDE D'EXPOSITION »	4
1.2. LA LATITUDE D'EXPOSITION EN ARGENTIQUE.....	5
1.2.1. <i>La courbe sensitométrique</i>	5
1.2.2. <i>La latitude de reproduction image</i>	10
1.2.3. <i>Le cas de la pellicule inversible</i>	11
1.2.4. <i>L'efficacité de la chaîne argentique</i>	13
1.3. LA LATITUDE D'EXPOSITION EN VIDEO NUMERIQUE	14
1.3.1. <i>La Latitude d'exposition du Capteur numérique</i>	14
1.3.2. <i>L'influence de la quantification</i>	21
1.3.3. <i>Les Traitements du signal</i>	24
1.3.4. <i>Le « Sensito Image » en Vidéo</i>	27
1.3.5. <i>Le Signal Vidéo : une Logique Inversible ?</i>	28
2. LA NOTION DE « NEGATIF NUMERIQUE »	29
2.1. LES COURBES FILMS DES CAMERAS VIDEOS	30
2.1.1. <i>La Sony HDW F900 et les « Hypergamma »</i>	30
2.1.2. <i>La Varicam et le Mode « Film Rec »</i>	36
2.2. L'ARRIVEE DES CAMERAS D-CINEMA.....	39
2.2.1. <i>Le Format Cinéon</i>	39
2.2.2. <i>La Viper et le Mode « FilmStream »</i>	41
2.2.3. <i>La Genesis et la Courbe « Panalog »</i>	54
2.2.4. <i>L'Arri D 20 et le Film Mode</i>	65
2.2.5. <i>La Dalsa Origin et le Mode « Raw »</i>	72
2.3. A L'AVENIR	74
 ANNEXE : PRESENTATION DE LA PARTIE PRATIQUE DE MEMOIRE	 78
BIBLIOGRAPHIE.....	83
REMERCIEMENTS	85