

Respect des niveaux de visibilité dans la restitution d'images de synthèse en unités physiques

R. Brémond

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
58 boulevard Lefebvre 75015 Paris

Roland.bremond@lcpc.fr

Résumé : *La visualisation sur écran des images de synthèse calculées en unités physiques (luminance, coordonnées XYZ) pose un problème spécifique si on souhaite respecter les performances visuelles des observateurs, et notamment les niveaux de visibilité des objets présents dans la scène. Nous présentons une méthode d'évaluation de la qualité visuelle du système de visualisation, qui comprend à la fois le système d'affichage et l'algorithme de transposition de luminance qui lui est associé. Un exemple de mise en œuvre de cette méthodologie est présenté, dans le cas des performances visuelles des automobilistes dans la simulation de conduite de jour. Les principales questions non résolues qui se posent pour la visualisation des images calculées en unités physiques sont identifiées dans le cas des images de synthèse destinées à la simulation de conduite.*

Mots-clés : Visibilité, perception, *tone mapping*, visualisation, transposition, luminance, couleur.

1. Introduction

Le LCPC¹ développe des techniques de synthèse d'images permettant de réaliser des études de visibilité et de lisibilité routière, notamment sur simulateur de conduite. Au stade actuel de nos recherches, le principal obstacle identifié à l'utilisation de telles images porte sur les procédés de visualisation sur écran des images calculées. Nous présentons, dans ce papier, la perspective selon laquelle nous envisageons ce problème, qui se pose d'une manière plus large en synthèse d'image, et nous indiquons selon quelle approche nous essayons de le résoudre.

Nous cherchons à évaluer la capacité des procédures de visualisation à respecter les performances visuelles des observateurs. L'objectif est de quantifier l'écart entre les images présentées et les scènes modélisées, et donc d'optimiser la chaîne globale « mesure / modélisation / calcul / visualisation », ce qui doit permettre d'élargir le domaine de validité des images de synthèse en unités physiques pour les études de visibilité et de lisibilité routière.

2. Les images en unités physiques



¹ Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées est un établissement public à caractère scientifique et technologique sous la double tutelle du ministère de la recherche et du ministère de l'équipement.

Fig. 1 : image de luminances calculée à partir d'un modèle des effets visuels du brouillard [Dum02].

Certaines images numériques sont définies en unités physiques. Elles proviennent de calculs simulant la propagation de la lumière (exemple Fig. 1), ou de mesures photométriques de l'environnement lumineux par des systèmes d'acquisition adéquats (exemple Fig. 2). Elles permettent de décrire les informations visuelles dans des unités physiques (luminance², coordonnées XYZ³ de la CIE⁴) qui représentent le signal visuel perçu par un observateur. La restitution de telles images sur un moniteur, sur l'écran d'un simulateur de conduite ou sur papier pose des problèmes spécifiques.

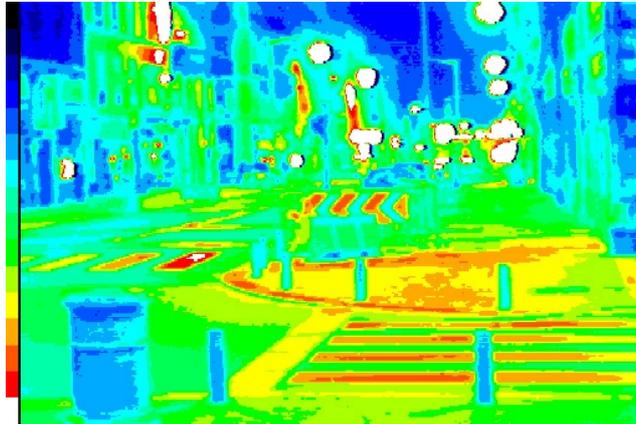


Fig. 2 : image de luminances (en fausses couleurs) obtenue par le système de mesure Mélusine [BH96]

3. Le système de restitution visuelle

3.1. Calibrage des écrans

Le premier problème à résoudre lors de l'affichage sur écran d'une image en unités physiques est de s'assurer que les valeurs physiques des couleurs et des luminances affichées correspondent aux valeurs prévues (Fig. 3). Pour cela, il est nécessaire de caractériser précisément le système de restitution. Pour un écran CRT, par exemple, l'affichage des images se base sur des valeurs d'adressage (des triplets d'entiers) correspondant aux phosphores Rouge, Vert et Bleu de l'écran : c'est le triplet [RVB].

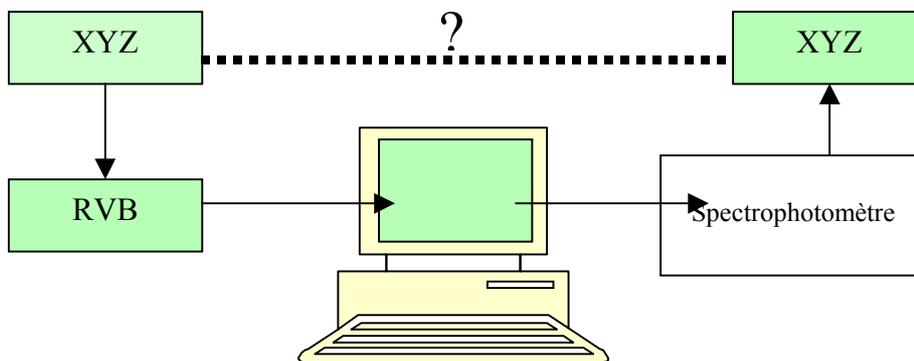


Fig. 3 : problématique du calibrage des écrans pour la restitution des images de synthèse en unités physiques.

A partir d'une image calculée décrite en unités tri-chromatiques [XYZ], il est donc nécessaire de connaître la correspondance entre un triplet quelconque [RVB] et le triplet [XYZ] qui sera observé sur cet écran. En pratique, cette étape repose sur une caractérisation photométrique et colorimétrique de l'écran utilisé. Pour un écran CRT, on utilise classiquement le modèle GOG (gain-offset-gamma) préconisé par la CIE [CIE122]. Il

2 La luminance représente l'intensité du signal visuel perçu par un observateur, en tenant compte des spécificités du système visuel humain.

3 Le triplet XYZ représente une quantité mesurable associée à un signal visuel. Il comporte trois composantes, correspondant aux trois variables nécessaires pour décrire la manière dont un observateur perçoit la lumière en conditions photopiques.

4 Commission Internationale de l'Eclairage.

consiste à modéliser la luminance affichée par un moniteur CRT comme la somme des luminances des trois canaux. Dans ce modèle, on estime que la luminance d'un canal peut être décrite par une fonction puissance de la valeur d'adressage (modulée par un gain) et par un bruit de fond (offset). Par exemple, pour le canal rouge, on écrira :

$$R = \left\{ g_r \left(\frac{I}{I_{\max}} \right) + (1 - g_r) \right\}^\gamma$$

R représentant la luminance du canal rouge, I la valeur d'adressage en rouge ($I_{\max} = 255$), les paramètres γ et g_r , étant déterminés par des mesures photométriques sur l'écran utilisé.

A partir d'une telle formulation, on peut inverser les équations et calculer la valeur d'adressage nécessaire pour afficher à l'écran une couleur XYZ donnée. Cette procédure permet de soumettre l'observateur au même stimulus visuel que ce qui était prévu dans l'image exprimée en unités physiques.

3.2. Limites techniques des écrans

Les systèmes de restitution présentent des limites techniques incontournables, qui font que l'affichage des valeurs en unités physiques (calculées ou mesurées) n'est pas toujours possible. Ces limites sont de plusieurs ordres:

- La stabilité des propriétés dans le temps (dérive) et dans l'espace (hétérogénéité), qui font que les modèles d'écran ne sont que des approximations, et qu'il est également nécessaire de caractériser les écarts par rapport au modèle.
- Le domaine de couleur (*gamut*) d'un écran est limité, certaines couleurs ne peuvent donc pas être affichées (Fig. 4).
- La quantification liée à la numérisation du signal conduit à des approximations. Il en résulte des écarts relatifs qui peuvent être significatifs, en particulier pour les faibles niveaux de luminance.
- La dynamique de luminance disponible est souvent beaucoup plus faible que celle qui est présente dans la scène à afficher. De plus, la luminance maximale disponible sur un écran donné dépend de la couleur affichée.

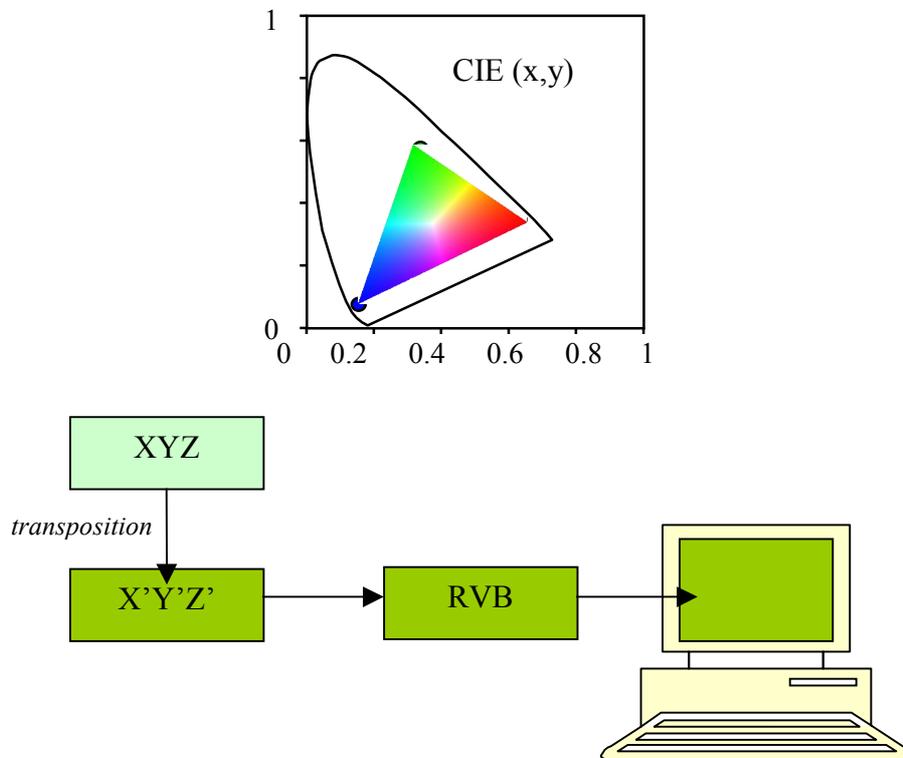


Fig. 4 : diagramme colorimétrique⁵ CIE, et exemple de gamut d'un système d'affichage.

⁵ Les coordonnées colorimétriques (x,y) sont des quantités mesurables caractérisant la couleur d'un objet indépendamment de sa luminance, définies par la CIE à partir de la distribution spectrale de la lumière.

Fig. 5 : principe de fonctionnement d'un algorithme de transposition

Ces limites sont contournées, en pratique, par des algorithmes de transposition permettant de convertir un signal visuel à afficher (de couleur XYZ) en un signal visuel différent (noté X'Y'Z' sur la Fig. 5) affichable par le système de restitution utilisé. Les algorithmes de transposition les plus étudiés sont les algorithmes de transposition de luminance (*tone mapping*), qui transposent les luminances à afficher dans un domaine de luminance accessible sur l'écran considéré.

Il résulte globalement de l'utilisation d'un algorithme de transposition une dégradation du signal, et des stratégies sont proposées dans la littérature pour minimiser cette dégradation [Tr93,War94,LRP97].

4. Evaluation de la qualité d'une transposition

4.1. Problématique

Le LCPC produit des images de synthèse en unités physiques, et contribue à la production de bases de données en unités physiques pour la simulation de conduite [BG02]. Ces images sont produites dans l'intention de procéder à des expérimentations avec des observateurs, afin d'étudier la visibilité et la lisibilité de l'environnement routier (Cf. par exemple [Pau01]).

Pour ces expérimentations, la dégradation des images calculées due aux limites des systèmes de restitution est susceptible d'avoir pour conséquence une modification des performances visuelles des observateurs, par comparaison avec les performances qu'ils auraient avec un système de restitution « idéal ». L'enjeu est donc pour nous de déterminer une stratégie de dégradation du signal qui minimise la modification du comportement des observateurs, notamment le niveau de visibilité des éléments visuels présentés aux observateurs [Pou99].

Dans ce but, un programme de travail a été défini, à partir des principaux enjeux identifiés, et une collaboration avec l'équipe « Vision » du MNHN⁶ a permis de proposer une méthode d'évaluation spécifique des algorithmes de transposition de luminance. Cette méthode a un champ d'application plus large, mais elle doit être adaptée en fonction des critères de « qualité » retenus pour toute utilisation particulière des images affichées. Elle est présentée ci-dessous, ainsi que son application dans le cas des scènes routières diurnes. Le problème particulier que posent les scènes routières nocturnes est détaillé à la section 4.

4.2. Méthodologie d'évaluation

On distingue deux grands domaines d'évaluation de la perception visuelle : l'apparence visuelle et la performance visuelle, cette dernière étant attachée non seulement à une image mais à une tâche visuelle associée à cette image. La méthode que nous présentons n'est pas spécifique à l'un ou l'autre de ces domaines, mais présente deux variantes, adaptées à l'un ou à l'autre.

L'apparence visuelle désigne les jugements subjectifs des observateurs relatifs à un stimulus visuel. Elle est souvent liée à des catégories d'appréhension implicites, comme le brillant, l'uniformité, l'apparence colorée, etc. Dans ce domaine, il n'y a pas de référence objective, pas de « bonne » réponse, mais chaque observateur conserve une certaine consistance dans ses jugements. C'est sur cette cohérence interne que l'on s'appuie pour évaluer la proximité entre deux stimuli visuels.

La performance visuelle est une performance associée à une tâche liée à un stimulus visuel. Il s'agit en général de tâches de détection ou d'identification d'objets dans une scène, pour lesquelles les réponses des observateurs ont une valeur de vérité (vrai ou faux). A partir du taux de bonnes réponses et éventuellement du délai de réponse, il est possible de définir un indicateur objectif de la performance visuelle de l'observateur pour une tâche spécifique [CIE145].

L'élément fondamental de notre approche consiste à utiliser un cadre de référence extérieur au domaine des images de synthèse, comme cela peut être fait, par exemple, avec une « véritable » *Cornell box*. Une scène matérielle est construite, dans laquelle des observateurs vont être soumis à une série de tests, permettant

⁶ Muséum National d'Histoire Naturelle

d'apprécier, soit leurs performances visuelles dans le domaine souhaité, soit les patterns caractéristiques de leurs jugement d'apparence visuelle.

Cette scène de référence est ensuite caractérisée photométriquement et numérisée (à partir de mesures photométriques, ou d'une modélisation géométrique et d'une simulation de la propagation de la lumière). C'est cette image numérique, considérée comme une représentation « fidèle » de la scène réelle, qui peut être visualisée sur écran. Pour cela, on doit utiliser un algorithme de transposition, qui doit être adapté au système physique de restitution utilisé (moniteur CRT ou LCD, projecteur sur écran CRT, LCD ou DSP, casque de réalité virtuelle, etc.)

L'indicateur visuel retenu sur la scène de référence (apparence ou performance visuelle) peut alors être évalué sur les images de synthèse affichées. C'est la plus ou moins grande correspondance entre la valeur de référence de l'indicateur et la valeur obtenue à partir des images de synthèse qui permettra de juger de la qualité de la restitution, *pour l'objectif poursuivi*, de l'ensemble « algorithme de transposition / système de restitution ».

4.3. Exemple d'application

Cette démarche suppose, avant toute chose, de spécifier l'usage des images de synthèse utilisées sur un support matériel donné. Nous nous sommes intéressés, avec cette méthode, au problème de la visibilité routière, et à la pertinence des images de synthèse (en présentation fixe ou sur simulateur de conduite) pour étudier ce problème crucial dans le domaine de la sécurité routière.



Fig. 6 : photographie de la scène de référence utilisée pour évaluer les indicateurs visuels pour des automobilistes en conduite de jour : panneau extérieur en polystyrène, tambour de présentation des images imprimées (ci-contre, pour une évaluation de l'apparence visuelle [Vie02a]).

A partir de cette problématique, les principaux éléments d'une expérimentation ont pu être fixés :

- L'enjeu porte principalement sur des performances visuelles liées à la tâche de conduite.
- Dans le domaine de la conduite de jour, les niveaux de luminance sont trop élevés pour être affichés sur un moniteur CRT classique, à plus forte raison sur l'écran d'un simulateur de conduite.

Une tâche visuelle a pu être définie (l'identification d'une ligne pointillée parmi 4 lignes parallèles), un moyen de restitution choisi (un moniteur CRT du MNHN) ainsi qu'un domaine de luminance, à partir des connaissances que nous avons sur les niveaux lumineux usuels en conduite automobile de jour.

Une expérimentation a eu lieu en deux temps : une scène de référence a été construite, et un système de présentation d'images imprimées a été mis au point dans ce cadre (Fig. 6). Des images correspondant à la tâche visuelle ont été imprimées avec différents niveaux de contraste entre les lignes et le fond. Des observateurs ont été confrontés à ces séries d'images imprimées, dans un environnement lumineux compris entre 0 et 1000 candélas par mètres carrés.

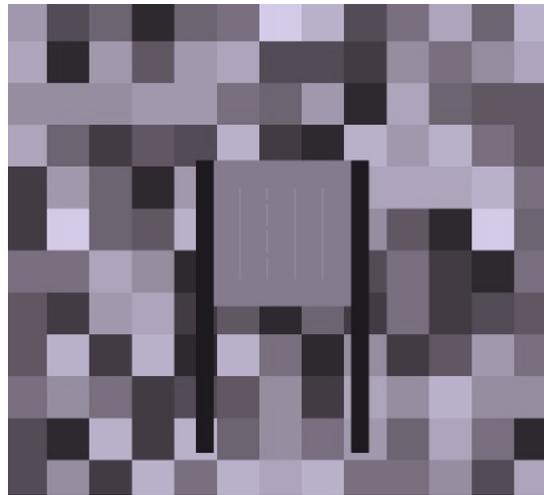


Fig. 7 :modélisation de la scène de référence utilisée pour évaluer les performances visuelles des automobilistes en conduite de jour.

Dans un deuxième temps, cette scène de référence a été caractérisée par des mesures photométriques, d'une part en ce qui concerne l'environnement (qui reste le même d'une présentation d'image à l'autre), d'autre part en ce qui concerne les tests présentés. A partir de ces mesures de luminance, des images de synthèse en luminance ont été produites. L'écran CRT utilisé a également été caractérisé par des mesures photométriques, et quatre algorithmes de transposition de luminance ont été sélectionnés dans la littérature [Vie02b]. Des séries d'images de synthèse RVB ont été calculées en vue de la visualisation sur cet écran (exemple Fig. 7). Nous avons ainsi pu comparer les performances visuelles des observateurs dans la situation de référence avec leurs performances devant les images résultant de 4 différents algorithmes de *tone mapping*. Cette démarche a ainsi permis d'évaluer la « qualité » relative de ces algorithmes, relativement à une tâche visuelle de détection en situation de conduite de jour.

5. Questions ouvertes

La méthodologie présentée a un domaine d'application relativement large dans le domaine de la synthèse d'image, pour tout ce qui touche au « réalisme ». Elle permet en particulier de lever l'ambiguïté sur ce mot, en quantifiant la notion de réalisme par rapport à un objectif bien défini en termes de perception visuelle.

Cependant, dans certains cas, la littérature en synthèse d'images ne propose pas de solution opérationnelle à des problèmes de « réalisme » visuel. On présente ci-dessous des exemples de problèmes non résolus, porteurs d'enjeux en matière de visibilité routière.

5.1. Conduite de nuit

L'exemple qui a été cité consistait à comparer entre eux des algorithmes de la littérature, et à quantifier à chaque fois l'écart par rapport à une performance visuelle de référence. Nous avons observé que dans le cas de la conduite de nuit, les algorithmes classiques de *tone mapping* ne sont pas adaptés, du fait d'une hypothèse forte qui pose un problème dans ce cas précis.

Un algorithme de *tone mapping*, comme son nom l'indique, est un algorithme de transposition de luminances. A partir d'une image en luminance dont la dynamique n'est pas affichable sur le système de restitution dont on dispose, il construit une image « compressée », selon une stratégie spécifique, dont la dynamique est compatible avec le système de restitution.

Dans un deuxième temps, l'image issue du *tone mapping* est transformée en image RVB grâce au modèle de calibrage du système (Cf. partie 2.2). Implicitement, cette procédure repose sur l'hypothèse que la dynamique de

luminance disponible sur le système de restitution est la même dans toute l'image. Malheureusement, ça n'est pas le cas : la dynamique disponible dépend de la couleur que l'on veut afficher, elle en dépend même fortement.

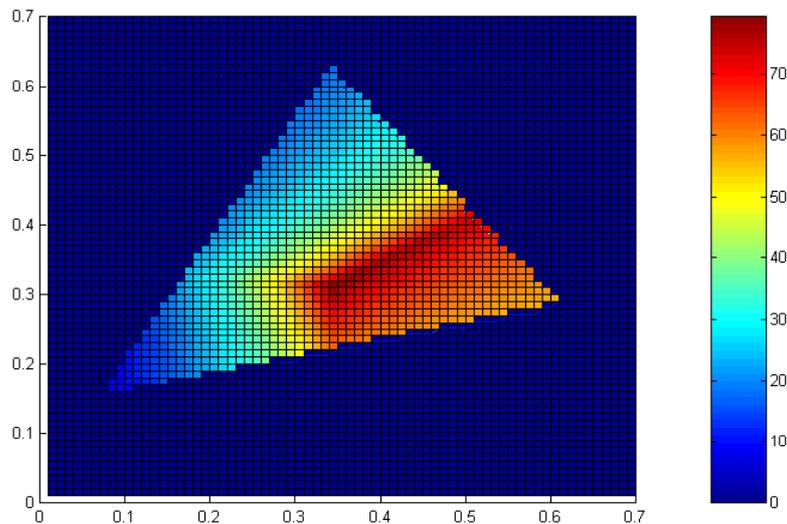


Fig. 8 : luminance maximale d'un écran CRT du MNHN en fonction de la couleur affichée, à l'intérieur du gamut de cet écran (en coordonnées colorimétriques xy).

En conduite de nuit, on se heurte à ce problème, car les feux arrière des véhicules doivent être rouges et très lumineux (par rapport au reste de la scène), alors que dans le rouge, la luminance maximale disponible est souvent significativement plus faible que dans le blanc.

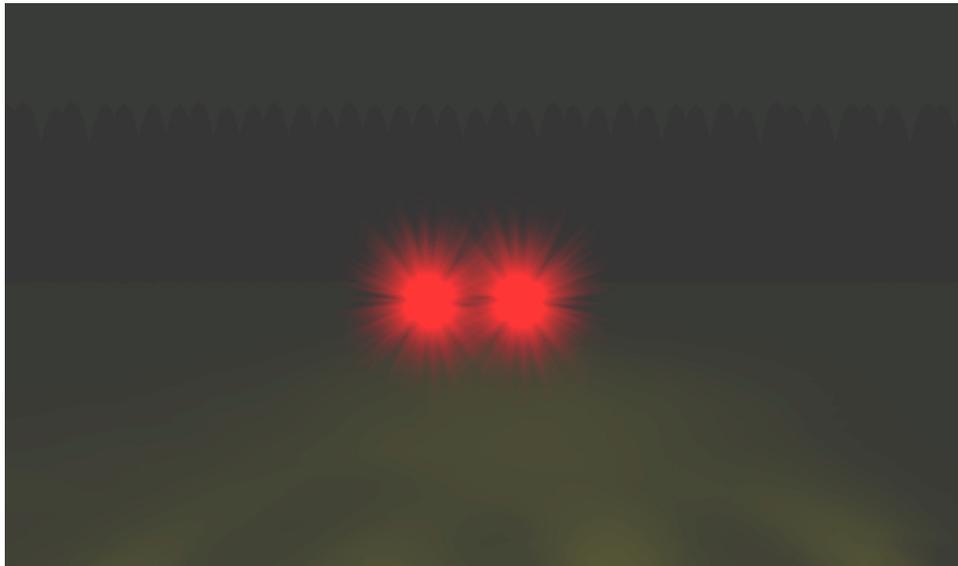


Fig. 9 : exemple d'image de synthèse comportant les feux arrière d'un véhicule [Voi02].

On se heurte donc à un problème très général, qui est de reconsidérer la notion de *tone mapping* en l'intégrant dans un processus complet portant sur une image physique colorée (décrite en unités XYZ) et non plus seulement sur une image de luminances. Les rares travaux abordant cette question [Voi02] doivent pouvoir être évalués à travers la méthodologie proposée ci-dessus.

5.2. Simulation de conduite

Si on considère le problème général de la tâche de conduite sur simulateur, on peut se fixer pour objectif de respecter le niveau de visibilité des objets présents dans la scène, entre une référence (le comportement sur la route) et un simulateur de conduite. La qualité des images doit donc être étudiée relativement à cette tâche de conduite, ce qui doit permettre de hiérarchiser les principales difficultés rencontrées dans cette étape de

visualisation des images de synthèse en unités physiques. On distingue ici trois cas de figure, pour lesquels la hiérarchie des enjeux est différente.

Conduite de jour :

- Le principal enjeu est le choix d'un algorithme de *tone mapping* respectant les niveaux de visibilité des objets, y compris en conditions de visibilité dégradée (chaussée humide, pluie, brouillard).

Conduite nocturne [BD02] :

- Le principal enjeu consiste à définir une procédure satisfaisante, du point de vue des performances visuelles, de « *color mapping* », qui transpose des couleurs XYZ et non pas seulement des luminances.
- Le rendu de l'éblouissement [Spe95], qui a un impact significatif sur le comportement de conduite la nuit, et qui ne peut pas être restitué directement sur écran, doit être évalué.
- La qualité de la restitution des bas niveaux lumineux est particulièrement importante.

Conduite en tunnel :

- Les problèmes d'adaptation visuelle lors des entrées et sorties de tunnel doivent être évalués, en fonction des solutions algorithmiques choisies pour le rendu de ces situations dans lesquels les niveaux lumineux changent brusquement.

Dans tous les cas de figure envisagés, les qualités et les défauts des différents modes de restitution (CRT, LCD et DSP) doivent être évalués en fonction des enjeux prioritaires.

Références

- [BD02] R. Brémond, E. Dumont, « *simulation de conduite nocturne* », rapport à la Direction des Routes du ministère de l'Équipement (diffusion restreinte).
- [BG02] R. Brémond, G. Gallée, « *Image quality for driving simulation experiments* », actes du congrès Virtual Reality International Conference 2002, Laval (France), juin 2002.
- [BH97] C. Brusque, R. Hubert, « *La métrologie de la luminance par caméra CCD. Etalonnage et qualification du système Mélusine* », Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 205, pp. 39-47.
- [CIE122] CIE, « *The relationship between digital and colorimetric data for controlled CRT displays* », CIE publication 122-1996.
- [CIE145] CIE, « *The correlation of models for vision and visual performance* », CIE Publication 145-2002.
- [Dum02] E. Dumont, « *caractérisation, modélisation et simulation des effets visuels du brouillard pour l'utilisateur de la route* » thèse de doctorat, université Paris V, novembre 2002.
- [Dum03] E. Dumont, R. Brémond, C. Boust, E. da Costa, F. Viénot, « *assessment of the visual quality of images for visibility experiments : psychometric evaluation of tone mapping algorithms* », poster retenu par le congrès de la Commission Internationale de l'Éclairage, San Diego, juin 2003.
- [LeG72] Y. Le Grand, « *Optique physiologique – Tome 2 : Lumière et couleurs* », Masson et Cie, Paris, France, 1972 (2ème édition).
- [LRP97] G. W. Larson, H. Rushmeier and C. Piatko, « *A Visibility Matching Tone Reproduction Operator for High Dynamic Range Scenes* », IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 3(4), October-December 1997, pp. 291–306.
- [Pou99] G. Pouliquen, « *Respect des niveaux de visibilité dans la restitution d'images de synthèse* ». Rapport de DEA, ESME/LCPC, septembre 1999.

- [Pau01] G. Paulmier, C. Brusque, V. Carta, V. Nguyen, “*Laboratory study of the influence of the visual complexity of the environment on the detection of the various types of target*”, Lighting Research and technology, 2001, Editor : RH Simons, Publisher : Arnold.
- [TR93] J. Tumblin and H. Rushmeier, “*Tone reproduction for Realistic Images*”, IEEE Computer Graphics & Applications, 13(6), November 1993, pp. 42–48.
- [Vie02a] F. Viénot, C. Boust, R. Brémond, E. Dumont, “*rating gradations for tone-mapping algorithms*”, IS&T, CGIV 2002, Poitiers, 2-5 April 2002, pp. 221-225.
- [Vie02b] F. Viénot, C. Boust, E. da Costa, R. Brémond, E. Dumont, « *psychometric assessment of the look and feel of digital images* », actes du congrès Driving Simulator Conference 2002, Paris, septembre 2002.
- [Voi02] Rapport final du projet Prédit VOIR, octobre 2002 (diffusion restreinte)
- [War94] G. Ward, “*A Contrast-based Scale Factor for Luminance Display*”, in Graphics Gems IV, ed. P. S. Heckbert, 1994, pp. 391–397.