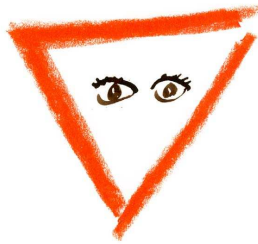


Université Paris Est, LEPSiS, UMR INRETS-LCPC

LA VISIBILITÉ ROUTIÈRE :
UNE APPROCHE PLURI-DISCIPLINAIRE



Roland BRÉMOND

mémoire présenté en vue de
l'habilitation à diriger des recherches
Université Paris Est

Composition du jury :

M.	Patrick LE CALLET	<i>Président</i>
Mme	Françoise VIÉNOT	<i>Rapporteur</i>
Mme	Corinne ROUMES	<i>Rapporteur</i>
M.	Bernard PÉROCHE	<i>Rapporteur</i>
Mme	Françoise DARSES	<i>Examineur</i>
M.	Andras KEMENY	<i>Examineur</i>
M.	Xavier PUEYO	<i>Examineur</i>

*Et juste devant Wally, il y avait le pare-brise,
tel l'écran d'ordinateur le plus grand et le plus fidèle qui existe,
qui diffusait en permanence... le monde réel.*
[Wes90]

Résumé : Nous nous inscrivons dans une approche **pluri-disciplinaire** en matière de **recherche appliquée**. Partant des besoins en matière de politique publique sur la perception visuelle dans les déplacements routiers et urbains, nous utilisons les connaissances issues de la recherche fondamentale en synthèse d'images et en sciences de la vision pour proposer des éléments de réponse.

Nous associons ainsi des modèles théoriques en **vision humaine** (photométrie, psychophysique, neurosciences) et des problématiques liées à la **visibilité routière** (simulation de conduite, éclairage public, perception dans un trafic simulé). La démarche privilégiée consiste à utiliser des **images de synthèse** pour produire des connaissances sur la visibilité routière, notamment avec les méthodes de la **psychologie expérimentale**. D'autres approches sont également explorées (ergonomie cognitive, photométrie, intelligence artificielle).

Les résultats académiques concernent des domaines variés : les calculs d'éclairage public pour la simulation de conduite, la visualisation des images de synthèse pour l'étude de la visibilité routière, la visibilité nocturne en conduite automobile, la saillance visuelle des objets routiers, ou la prise d'information visuelle pour la simulation de conduite et la simulation de trafic. Sur le plan des applications routières, nous avons contribué à la clarification du vocabulaire et des enjeux de la visibilité routière, ainsi qu'aux méthodes de diagnostic de la visibilité routière et de dimensionnement de l'éclairage public.

Au cours des dernières années, nous avons également participé au développement de liens entre le LCPC et l'INRETS autour des problématiques de perception visuelle et de **simulation de conduite**. Nous avons notamment contribué en 2007 à la création d'un GIS sur la *Simulation pour les Recherches sur la Sécurité Routière* (SRSR), puis en 2009 à la création d'une unité mixte INRETS-LCPC, le *Laboratoire Exploitation, Perception, Simulateurs et Simulations* (LEPSiS).

En conclusion, nous soutenons que notre travail contribue à faire émerger la visibilité routière comme une problématique scientifique légitime, que nous abordons à partir de la vision humaine et des images, à la fois images de synthèse et images issues de capteurs.

Mots clé : Recherche appliquée, Recherche pluri-disciplinaire, visibilité routière, système visuel humain, images de synthèse, psychologie expérimentale, simulation de conduite.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Une recherche appliquée	1
1.2	Une recherche pluri-disciplinaire	3
1.3	Une formation éclectique	9
1.4	Organisation du document	10
2	Enjeux de la vision en conduite automobile	11
2.1	Enjeux de politique publique	12
2.1.1	Sécurité routière	13
2.1.2	Développement durable	14
2.1.3	Sécurité des biens et des personnes	15
2.2	Prise d'information visuelle en conduite	15
2.3	Eclairage public et automobile	16
2.4	Lisibilité de la route	18
2.5	Un outil : les images de synthèse	19
2.6	Besoins de recherche	20
3	Démarche : des images de synthèse à la psychologie cognitive	23
3.1	Questions de recherche : voir / regarder la route	23
3.2	Deux approches successives	24
4	Détection en conduite automobile	27
4.1	Calcul du niveau de visibilité	30
4.1.1	Contribution : Méthode de mesure de la visibilité routière	30
4.1.2	Contribution : Calculs de visibilité sur des images routières	31
4.2	Diagnostic de la visibilité nocturne	32
4.2.1	Contribution : Méthode de diagnostic de la visibilité nocturne	32
4.3	Approche ergonomique de l'éclairage public	33
4.3.1	Contribution : Effet de la tâche de conduite sur la visibilité	33

4.3.2	Contribution : Effet du contexte sur la visibilité	35
4.3.3	Contribution : Dimensionnement de l'éclairage public	36
4.4	Bilan et perspectives	38
5	Prise d'information visuelle dans les déplacements	41
5.1	Saillance visuelle	42
5.1.1	Contribution : Saillance visuelle des objets routiers .	43
5.1.2	Contribution : Calcul de la saillance par traitement d'image	43
5.2	Prise d'information visuelle en réalité virtuelle	45
5.2.1	Contribution : Comparaison entre vidéo et réalité vir- tuelle	46
5.3	Prise d'information visuelle par des « agents » simulés . . .	48
5.3.1	Contribution : Modèle informatique de piéton	48
5.3.2	Contribution : Fonction de perception	49
5.4	Bilan et perspectives	51
6	Des images « réalistes » pour les recherches routières	53
6.1	Calculs d'illumination globale et locale	54
6.1.1	Contribution : Simuler les échanges lumineux	56
6.1.2	Contribution : Calculs d'éclairage pour la réalité vir- tuelle	57
6.1.3	Contribution : Rendu des textures	61
6.2	Visualisation des images de synthèse	62
6.2.1	Contribution : Evaluation psycho-visuelle	64
6.2.2	Contribution : <i>TMO</i> dédié à l'étude de la visibilité . .	65
6.2.3	Contribution : <i>TMO</i> dédié aux simulateurs de conduite	68
6.3	Perception des images et modèles de vision humaine	70
6.3.1	Contribution : Qualité perceptive des images	70
6.3.2	Contribution : Cartes de saillance pour des images HDR	72
6.4	Bilan et perspectives	73
6.4.1	Calcul des images de synthèse	73
6.4.2	Visualisation des images	74
6.4.3	Perception des images	74
7	Conclusion et Perspectives	77
7.1	Publications, collaborations et encadrement	77
7.2	Retour sur la démarche	80
7.3	Perspectives de recherche	83
7.3.1	Voir	83
7.3.2	Regarder	84
7.3.3	Des images « réalistes »	86
7.4	Perspectives pratiques	87

Chapitre 1

Introduction

Nos problématiques de recherche ont évolué au cours des quinze dernières années à partir de trois axes principaux : l'image, la modélisation et la finalité pratique des recherches. Dans un premier temps (thèse à l'ENSMP¹), des méthodes de traitement d'image ont été envisagées comme un moyen astucieux de modéliser un phénomène hydrodynamique, pour un objectif concret (le dimensionnement de filtres à fonte en céramique), en collaboration avec un industriel. Puis, au LCPC², nous nous sommes intéressés aux images du point de vue de l'observateur humain. Il s'agit de produire des images de synthèse qui soient vues « comme » les scènes représentées, ce qui implique de modéliser les processus de vision humaine. La question posée est celle du « réalisme » perceptif. La finalité de ces travaux est d'utiliser des images de synthèse pour évaluer la visibilité routière, et contribuer ainsi à améliorer la sécurité routière. Cet objectif nous a conduit, progressivement, à utiliser des images dans des expérimentations psycho-visuelles. En centrant notre problématique de recherche sur la vision humaine appliquée à la **visibilité routière**, nous avons ainsi élargi notre activité à des problèmes appliqués de visibilité, pour lesquels les images de synthèse constituent un outil privilégié (notamment à travers la simulation de conduite), tandis que les méthodologies les plus pertinentes procèdent de la psychologie expérimentale.

1.1 Une recherche appliquée

La raison d'être de la recherche appliquée (finalisée) est la production de connaissances utiles, à moyen terme, dans un domaine socio-technique (pour le LCPC, la conception et l'entretien des infrastructures de transport

¹ENSMP : Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. Une liste des acronymes utilisés dans le document est consultable en Annexe.

²LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

terrestre), par opposition aux connaissances issues de la recherche fondamentale, disciplinaires, qui ont une plus grande généralité.

Le chercheur « appliqué » est confronté à un double objectif : connaître les besoins du terrain, et trouver les méthodes adaptées, dans son champ disciplinaire, pour faire sauter les verrous scientifiques identifiés. Il vise également une double reconnaissance : académique, à travers des publications scientifiques, et applicative, à travers les institutions orientées, dans son domaine d'application, vers le transfert des connaissances et l'expertise.

Certes, la recherche appliquée occupe une position « dominée » dans le champ de la recherche scientifique, par rapport à la recherche fondamentale [Bou97]. Cette domination peut être illustrée par l'évaluation des laboratoires par l'AERES³, qui s'appuie principalement sur les publications académiques. Mais paradoxalement, cette situation permet une grande liberté⁴, en même temps qu'elle fournit des moyens techniques spécifiques⁵ et une connaissance des besoins du terrain, à travers des organismes, services techniques et syndicats professionnels du domaine⁶.

L'enjeu majeur de nos recherches est la sécurité routière, en considérant la route et ses équipements comme des moyens permettant d'améliorer la sécurité. Notre contribution porte plus spécifiquement sur les aspects visuels. Dans ce document, nous proposons une approche qui s'inscrit dans la logique de la recherche appliquée. Nous définissons notre problématique à partir des besoins des praticiens, autour d'une question concrète, la visibilité routière. De ce fait, si nos recherches visaient à répondre à des problèmes concrets, elles ont également permis de construire une problématique originale, dont le document présent veut montrer la cohérence. Elles s'articulent autour de deux choix : celui d'inclure les enjeux sociaux des recherches dans le périmètre de nos recherches, et celui de la pluridisciplinarité.

Le premier choix est en définitive celui de la recherche appliquée, puisque la production de connaissances utiles, dans un environnement socio-technique, implique pour un chercheur un investissement important dans des domaines d'application, donc de s'intéresser aux enjeux des recherches pour les pouvoirs publics et pour les praticiens : dans le cas du LCPC, les DAC⁷ et STC⁸ du MEEDDM⁹, les gestionnaires routiers et différents profession-

³AERES : Agence d'Evaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur.

⁴Cf. par exemple les travaux de G. de Gennes à l'ESPCI.

⁵Au LCPC par exemple, le laboratoire de photométrie développé pour la certification et la normalisation des équipements de la route, ou les matériels **mlpc**.

⁶Dans le domaine de l'aménagement visuel de la route, l'AFE, le CERTU, la CIE, la DSCR, les CETE, le SETRA, etc.

⁷DAC : Direction d'Administration Centrale.

⁸STC : Service Technique Central.

⁹MEEDDM : Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la

nels de la route. Pour notre part, des revues de littérature technique et des entretiens avec des experts nous ont notamment permis de mieux comprendre ces enjeux (sur l'éclairage urbain [Bré01], l'éclairage autoroutier [BD01], sur la perception dans les déplacements [Bré03b] ou sur les enjeux urbains de la visibilité routière [Bré04]). L'idée était de constituer une expertise sur les usages sociaux des résultats de nos recherches, de manière à mener des travaux qui aient une utilité sociale aussi directe que possible, et de définir des problématiques scientifiques adaptées à ces besoins sociaux. Cette démarche passe également par des liens avec les professionnels (par exemple, pour l'éclairage, à travers l'AFE¹⁰ et le CNFE¹¹), par des collaborations dans des projets de recherche avec des industriels [Bré03a] et des gestionnaires routiers [Bré07d, Bré08d, Bré09]. Cela implique également d'être attentif au transfert industriel des résultats de la recherche et aux enjeux concrets des professionnels (e.g. participation à des groupes techniques en éclairage public pilotés par le CERTU¹², l'ADEME¹³ et l'AITF¹⁴, expertises de projets soumis au FUI¹⁵).

1.2 Une recherche pluri-disciplinaire

Le parti pris de définir des questions de recherche à partir des besoins sociaux nous a conduit à assumer le fait que la résolution des problèmes scientifiques identifiés peut faire appel à des outils et méthodes relevant de plusieurs domaines académiques, et notamment, à la fois des SPI¹⁶ et des SHS¹⁷.

Quand on fait un panorama des (nombreuses) questions scientifiques non résolues liées à la vision en situation de conduite automobile (ou même aux piétons, Cf. [TAB08]), on s'aperçoit que l'approche ingénieur ne suffit pas : par exemple, la visibilité au sens de la photométrie [CIE81] ne correspond pas entièrement à la visibilité routière pour l'automobiliste. En même temps, l'approche psychologique telle qu'elle est représentée dans des revues comme *TR-F*¹⁸ ne permet pas directement de fournir des recommandations et des outils utiles aux praticiens. De là le choix d'identifier et de mettre en oeuvre sans *a priori* académique les méthodes les plus pertinentes

Mer.

¹⁰AFE : Association Française de l'Eclairage.

¹¹CNFE : Centre National Français de l'Eclairage.

¹²CERTU : Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques.

¹³ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.

¹⁴AITF : Association des Ingénieurs Territoriaux de France

¹⁵FUI : Fond Unique Interministeriel.

¹⁶SPI : Sciences Pour l'Ingénieur.

¹⁷SHS : Sciences Humaines et Sociales.

¹⁸*TR-F : Transportation Research - Part F : Traffic psychology and behaviour.*

pour traiter de la visibilité routière.

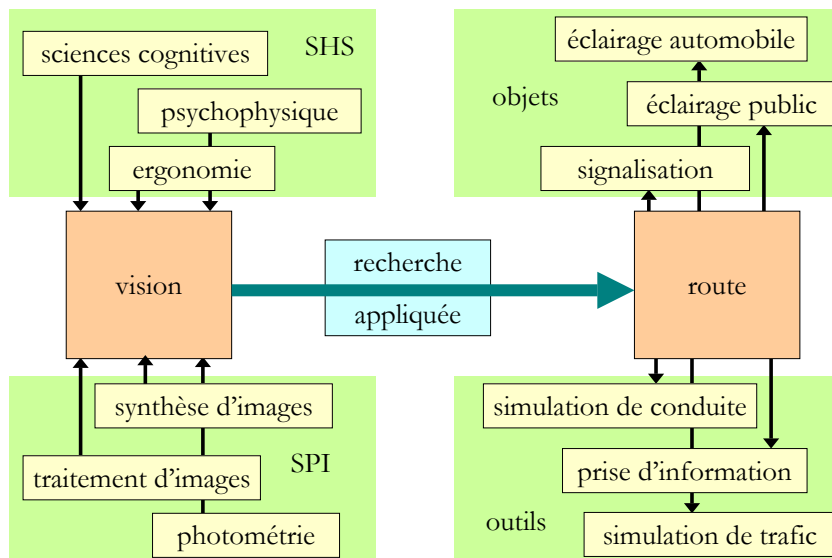


FIG. 1.1 – Recherche appliquée à la visibilité routière : une approche pluri-disciplinaire.

L'approche retenue a consisté à aborder une question concrète, la visibilité routière, avec une boîte à outils pluri-disciplinaire. Cela nous a conduit, après un diplôme d'ingénieur de l'ENPC¹⁹ et une thèse en traitement d'images, à une évolution de nos compétences, de manière à maîtriser au mieux un ensemble de disciplines scientifiques et techniques en lien avec l'objet de recherche.

La pluri-disciplinarité que nous avons progressivement fait émerger autour de la visibilité routière peut s'expliquer, en première analyse, par le fait que l'enjeu principal, la sécurité routière, est liée à des observables qui décrivent le comportement des conducteurs (en termes de vitesse, de trajectoire, etc.). Dans la boucle classique perception-décision-action, la perception est un intermédiaire entre le « signal visuel » et le comportement de conduite, mais cet intermédiaire n'est pas observable directement, étant de l'ordre du subjectif. On peut seulement l'inférer à l'aide d'observables secondaires (performance visuelle, verbalisation, etc.). Ainsi la visibilité routière est à l'interface entre un objet qui relève de la psychologie expérimentale (la perception), et des observables qui relèvent notamment de la physique et de la métrologie (environnement visuel, éclairage, photométrie, vitesse, trajectoires, etc.).

Au sens des disciplines académiques, notre approche est pluri-disciplinaire

¹⁹ENPC : Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

(Fig. 1.1, partie gauche). Le domaine que nous avons privilégié est celui des **images de synthèse**, considérées à la fois comme le résultat d'un calcul de propagation de la lumière et comme le support d'expériences psychovisuelles (y compris sur simulateur de conduite). Nous nous appuyons, pour faire le lien entre image et vision, sur la littérature académique en sciences de la vision, qui relèvent à la fois de la psychophysique « à l'ancienne » [LG56a, LG56b] et des neurosciences [Rod03] ; nous suivons en cela un courant déjà ancien (Cf. [Sto72, Mar82]). La psychologie expérimentale est retenue comme le principal cadre théorique pour décrire la vision humaine, mais aussi, en retour, pour évaluer les images de synthèse. D'autres approches, complémentaires, ont été abordées dans nos travaux, comme la photométrie, qui reste le meilleur support pour opérationnaliser les recommandations aux ingénieurs routiers (à travers, par exemple, la Division 4 de la CIE²⁰) et l'analyse d'images routières (en particulier, avec la question de la qualité perceptive des images issues des capteurs). L'intelligence artificielle permet également une approche intéressante pour la simulation de trafic, et nous l'avons abordée en posant la question de la perception de l'environnement par les automobilistes et les piétons simulés dans de tels modèles.

Les domaines d'application en termes de métiers vont de l'éclairage public à l'éclairage automobile et au diagnostic routier, ce qui touche à la fois les services techniques des collectivités, les bureaux d'étude éclairagistes, les sociétés d'autoroutes, les équipementiers et constructeurs automobiles, les fabricants de signalisation (horizontale et verticale), et plus généralement les gestionnaires routiers et leurs prestataires. La constitution de la doctrine technique nationale routière intéresse plus spécifiquement le MEEDDM : DSCR²¹, DRI²², SETRA²³, CERTU et CETE²⁴.

Sur le plan scientifique, la pluri-disciplinarité s'est traduite par des collaborations avec H. Brettel (ENST²⁵) et F. Viénot (MNHN²⁶) en sciences de la vision pour aborder la question de la perception des images de synthèse (thèses de V. Boulanger, master de C. Boust), avec B. Péroche en synthèse d'images (master de G. Pouliquen, thèses de J. Grave et J. Petit), avec C. Bastien (Univ. Paris Descartes, puis Univ. Metz) en ergonomie cognitive (thèse de A. Mayeur), enfin avec J.-M. Auberlet et S. Espié sur la simulation de trafic et la simulation de conduite (post-docs de I. Giannopulu et A. Tom,

²⁰CIE : Commission Internationale de l'Eclairage. Division 4 : *Lighting and Signalling for Transport*, www.cie.co.at/div4.

²¹DSCR : Direction de la Sécurité et de la Circulation Routière.

²²DRI : Direction de la Recherche et de l'Innovation.

²³SETRA : Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes.

²⁴CETE : Centre d'Etude Technique de l'Equipement.

²⁵ENST : Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications.

²⁶MNHN : Museum National d'Histoire Naturelle.

thèse de U. Ketenci), et de manière informelle avec M. Akil (ESIEE²⁷) sur la programmation temps réel (master de F. Chesnel).

Cette approche concerne également les méthodes de travail : le management est une bonne école de la pluri-disciplinarité. Nous avons assuré la fonction de *chef de section* d'une petite équipe de recherche pluri-disciplinaire (photométrie, vision humaine, traitement d'images, synthèse d'images et urbanisme) entre 2001 et 2005 au LCPC. Nous avons également assuré le montage et le pilotage d'un projet PREDIT²⁸ (VIZIR²⁹), pour le compte du LCPC, projet incluant 15 partenaires (laboratoires de recherche appliquée SPI et SHS, industriels, collectivités locales) [GGD⁺07a, GGD⁺07b, GGD⁺08, Bré07d, Bré08d, Bré09].

D'autres projets de recherche pluri-disciplinaires ont été montés en réponse à des appels d'offre du PREDIT, qui était le cadre national de labélisation des projets de recherche dans le domaine des transports dès avant la création de l'ANR³⁰, mais également du PCRD³¹ au niveau européen, et au niveau national de la Fondation Sécurité Routière (FSR), du RNTL³² et du FUI, à vocation plus industrielle. Par exemple, nous avons monté le projet « Visibilité des Piétons en Ville » (VPV)³³ soumis au PREDIT, contribué au montage des projets ETT³⁴, Safestrip³⁵, WET³⁶ du PCRD, INDRA³⁷ du RNTL, SURVIE³⁸ du FUI (pôle de compétitivité Mooveo), SICAP³⁹ de la FSR.

²⁷ESIEE : Ecole Supérieure d'Ingénieurs en Electronique et Electrotechnique.

²⁸PREDIT : Programme de REcherche et D'Innovation dans les Transports.

²⁹VIZIR : Vision Intelligente des Zones et Itinéraires à Risque. Projet du PREDIT (2005-2009) doté d'un budget 4 millions d'euros dans le cadre de l'action concertée SARI, Cf. www.sari.prd.fr. Le Projet SARI a reçu le prix de l'innovation lors du congrès ITS Bretagne en 2007.

³⁰ANR : Agence Nationale pour la Recherche.

³¹PCRD : Programme Cadre Recherche et Développement.

³²RNTL : Réseau National des Technologies Logicielles.

³³VPV : Visibilité des Piétons en Ville. Projet visant à développer des connaissances sur la perception des piétons en ville (INRETS, LCPC), projet rejeté par le PREDIT.

³⁴ETT : STREP visant à monter un réseau européen de laboratoires pour l'expérimentation routière en condition météo dégradée. Projet piloté par la Fondation Universitaire Luxembourgeoise (projet rejeté par le PCRD).

³⁵Safestrip : Projet FP7 visant à évaluer les performances de dispositifs de guidage visuel sur autoroute, piloté par l'ERF (projet rejeté par le PCRD).

³⁶WET : Projet Open-FET visant à produire des images de synthèse de route sous pluie qui soient psychologiquement valides (Univ. Girona, Univ. Limoges, Univ. Weimar, Univ. Bristol, LEPSiS), projet rejeté par le PCRD, en cours de ré-écriture.

³⁷INDRA : Projet RNTL sur la simulation de pluie piloté par Oktal, projet rejeté par le RNTL.

³⁸SURVIE : Projet FUI (pôle de compétitivité Mooveo) piloté par Nexyad, visant à définir des méthodes de mesure de la visibilité sous pluie, projet accepté en 2009.

³⁹SICAP : Projet FSR alliant la psychologie expérimentale, l'éthologie, la réalité virtuelle et l'intelligence artificielle pour modéliser les piétons dans les simulations de trafic urbain (INRETS, LEPSiS, LRPC Saint Briec, Ville de Paris), accepté en 2008.

Le rapprochement des équipes de recherche est un autre moyen concret d'organiser des recherches pluri-disciplinaires. C'était un des enjeux du montage du GIS⁴⁰ intitulé *la Simulation pour les Recherches sur la Sécurité Routière* (SRSR) créé en 2007 entre le LCPC, l'INRETS⁴¹, le CNRS⁴², et les CHU⁴³ de Bordeaux et Caen⁴⁴, et du rapprochement entre les unités de recherche DESE⁴⁵ du LCPC et MSIS⁴⁶ de l'INRETS, fusionnées en 2009 lors de la création de l'UMR LEPSiS⁴⁷.

On peut également mentionner l'intérêt d'outils et de moyens expérimentaux spécifiques, comme la salle d'expérimentations psycho-visuelles du LCPC (CLOVIS⁴⁸) depuis 2002 [BC02], les systèmes de suivi du regard (*eye tracker*) acquis par le LEPSiS en 2007 et 2009, ou l'écran Haute Dynamique de Luminance (*HDR*⁴⁹) en cours d'acquisition par le biais de l'Institut Carnot VITRES⁵⁰.

En termes de diffusion des connaissances, qu'il s'agisse d'encadrement d'étudiants, d'enseignement ou de vulgarisation au sens large, l'approche pluri-disciplinaire se traduit par un rôle de « passeur » entre les disciplines, ou entre chercheurs et praticiens, et par le choix de sujets de recherche à l'interface de plusieurs disciplines. Ces recherches n'auraient pu se faire sans les étudiants avec qui nous avons eu le plaisir de travailler, en master recherche [Lay97, Pou99, Mor00]⁵¹, en master pro [Lux01, Tro02, Gal05, Deu05]⁵², en stage ingénieur [Car02, And04]⁵³, en thèse professionnelle [Jan01]⁵⁴ ou universitaire [Bou00, Gra06, May09]⁵⁵. On remarquera (Cf.

⁴⁰GIS : Groupement d'Intérêt Scientifique.

⁴¹INRETS : Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité.

⁴²CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique.

⁴³CHU : Centre Hospitalo-Universitaire.

⁴⁴Nous sommes secrétaire du conseil scientifique de ce GIS depuis 2007.

⁴⁵DESE : Division Exploitation, Signalisation, Eclairage.

⁴⁶MSiS : Modélisation, Simulation, Simulateurs.

⁴⁷LEPSiS : Laboratoire Exploitation, Perception, Simulateurs et Simulations.

⁴⁸CLOVIS : Clovis est un Local de Visualisation d'Images de Synthèse.

⁴⁹HDR : *High Dynamic Range* en anglais, Habilitation à Diriger des Recherches en français.

⁵⁰VITRES : Innovation dans la Ville, les Infrastructures de Transports, les Réseaux, l'Environnement et les Services.

⁵¹Benoît Mordelet a été embauché comme ingénieur chez Activia Network (startup absorbée par Stratacache).

⁵²Vincent Lux a été embauché en 2001 par Oktal SA (Boulogne). Romain Gallen a été embauché en 2006 en CDD au LIVIC, puis en thèse au LCPC en 2007. Marion Deugnier a été embauchée en 2005 à l'INRETS, puis en 2007 au service Voirie de la Ville de Paris.

⁵³Jean-Philippe Caruana a été embauché en 2003 comme ingénieur d'études chez ATOS Origin.

⁵⁴Xavier Janc a intégré en 2001 la Direction de la Voirie et des déplacements de la Ville de Paris.

⁵⁵V. Boulanger : Thèse ENST, sous la dir. H. Brettel. Elle a été embauchée en 2001 par *Alcatel Space* puis par *l'European Spatial Agency*. J. Grave : Thèse Univ. Lyon I, dir. B. Péroche. Elle a été embauchée en 2006 dans la division biométrie du groupe Sagem. A. Mayeur : Thèse Univ. Paris Descartes, dir. R. Mollard. A. Mayeur effectue un post-doc au LIMSI (U.

notes ci-dessous) les spécialités variées des étudiants (synthèse d'image, intelligence artificielle, psycho-ergonomie, management public), mais aussi les nombreux sujets à cheval entre image et vision [Bou00, Pou99, Gal05, Gra06].

Il faut également souligner l'intérêt de la vulgarisation « croisée » pour développer une approche pluri-disciplinaire : il s'agit de « traduire » l'état des connaissances ou des questionnements, dans une discipline ou dans un domaine technique, à l'adresse de chercheurs ou praticiens d'une autre discipline ou d'un autre domaine technique. C'était l'objet principal du vocabulaire de la visibilité routière [Bré06d, Bré07e] mis en ligne sur le site web du LCPC. C'est aussi le cas de plusieurs résumés en français de rapports techniques de la Commission Internationale de l'Eclairage [CIE81, CIE92a, CIE92b, CIE95, CIE00b, CIE00a], de résumés partiels de documents techniques français dans le domaine de la visibilité routière [SET92, CER94, DRA02, AFE02], ou de résumés de cours en ergonomie [Ama01], en sociologie des sciences [Bou01] et en neurosciences [Ber02, BD03, Ber04]. En outre, nous avons profité de séminaires internes du LCPC pour présenter aux ingénieurs et chercheurs du ministère de l'Équipement l'intérêt d'une approche psychologique des problématiques routières [BD03, Bré06b, Bré06a], y compris à travers des présentations d'articles scientifiques classiques touchant à la vision ou la visibilité, comme ceux de Gibson [GC38], Adrian [Adr89], Sivak [Siv96], Newman [New99] et Bhise [BMF⁺81]. Une expérimentation menée lors de la thèse d'A. Mayeur a même été présentée lors de la fête de la science en 2007 [LCP07].

Parallèlement à ces activités de recherche, nous avons enseigné dans différentes disciplines, principalement en SPI : mathématiques⁵⁶, informatique⁵⁷, traitement d'images⁵⁸, électronique⁵⁹, multimédia⁶⁰, synthèse d'images⁶¹, mais aussi ergonomie⁶².

Paris Sud) depuis février 2010. J. Petit : Thèse Univ. Lyon I, dir. B. Péroche (en cours). C. Floch : Thèse Paris VI, dir. P. Brézillon, co-encadrée avec J.-M. Auberlet (LEPSiS). C. Floch a interrompu sa thèse en 2008 et a été embauchée chez Oxiane (www.oxiane.com). U. Kentenci : Thèse Univ. Valenciennes (en cours), dir. E. Griselin, co-encadrée avec J.-M. Auberlet (LEPSiS)

⁵⁶Chargé de TD en mathématiques à l'Université Paris IX (DEUG) en 1991-92, chargé de TD de statistiques et de Techniques Quantitatives de Gestion à l'Université Paris I en 1995-96.

⁵⁷Chargé de TP à l'Université Paris IX (DEUG) en 1991-92, et à l'IUT Cachan en 1995-96.

⁵⁸Chargé de cours et de TP à l'ENSMP (1990-93), à l'Université Lomonossov (Moscou) en 1992 et à l'Université de Delft (Pays-Bas) en 1994.

⁵⁹Chargé de TP d'électronique à l'IUT de Cachan en 1995-1996.

⁶⁰Chargé de cours en DESS multimédia à l'Université Paris VIII en 1996.

⁶¹Séminaire de synthèse d'images à l'Univ. Limoges en 2007, intervention à l'ENPC en 2008.

⁶²interventions en Master 2 Ergonomie à l'Université Paris Descartes en 2007 et 2008.

1.3 Une formation éclectique

Notre parcours scientifique, avant d'intégrer le LCPC, portait sur des problèmes de recherche appliquée, déjà à cheval entre plusieurs disciplines, ce qui semble leur donner rétrospectivement un aspect de « préparation ». Ingénieur ENPC (spécialité informatique), nous avons suivi le DEA⁶³ d'intelligence artificielle Paris V/ENPC, qui nous a amené au traitement d'images (stage au CMM⁶⁴ de l'ENSMP), mais aussi aux sciences humaines, avec un projet d'intelligence artificielle [Bré90] basé sur une implémentation informatique des règles d'alliance matrimoniale décrites par Levi-Strauss dans [LS49].

Avant de travailler sur la visibilité routière, nous nous sommes intéressés en thèse, sous la direction de D. Jeulin au CMM, à d'autres problèmes de recherche appliquée, avec la même démarche pluri-disciplinaire [Bré93]. D'une part, un problème hydrodynamique a été abordé avec des méthodes issues à la fois de la physique statistique [FHP86] et de l'analyse d'image [Ser82, Ser88]. La finalité pratique était d'améliorer les procédés de filtration de la fonte [BJDA92, BJ94a, BJ94b, BJ94c, BJAH95, BJAH97], ce qui s'est concrétisé, à l'issue de la thèse, par un CDD dans une usine de production de Saint Gobain, pour implémenter les résultats. D'autre part, nous nous sommes intéressés, avec l'IFP⁶⁵, à la propagation de matière dans les milieux poreux, toujours en utilisant des techniques d'analyse d'image pour simuler des propriétés physiques [BJG⁺94].

On voit que certains aspects essentiels de nos travaux ultérieurs étaient en germe : l'aspect pluri-disciplinaire (y compris avec les sciences humaines, en DEA), l'image et la recherche appliquée (ingénieur ENPC, thèse appliquée financée par Saint Gobain suivie par un CDD en production).

Cette thèse a été suivie par une année post-doctorale dans le domaine de l'analyse d'images à l'UPC⁶⁶ [Bré95, BM96], puis au LCPC par des formations continues en informatique (C++, *Silicon Graphics*), en éclairage public (cours AFE niveau 2), en sociologie [Bou01], en neurosciences [Cha97, Ber02, BD03, Ber04], en sécurité routière (ENPC), en management (Demos), et enfin en psychologie, avec une Licence de psychologie par correspondance validée entre 2004 et 2008 par l'Université Paris VIII [Bré08b, Bré08a, Bré08c]. Nous nous approchons ainsi modestement de l'idéal polytechnicien, au sens des compétences du dieu gaulois Lug poly-technicien (*Samhildánach* : « *Equally skilled in many arts* », Cf. [Duv76]).

⁶³DEA : Diplôme d'Etudes Approfondies.

⁶⁴CMM : Centre de Morphologie Mathématique.

⁶⁵IFP : Institut Français du Pétrole.

⁶⁶UPC : *Universitat Politècnica de Catalunya* (Barcelone). Ce post-doc était financé par le programme *Human Capital and Mobility* de la Commission Européenne.

1.4 Organisation du document

La présentation d'une synthèse de nos travaux posait quelques questions, et obligeait à des choix. On pouvait les présenter par application, de l'éclairage public à la simulation de conduite, ou par domaine académique, des images de synthèse à l'ergonomie.

Nous avons pris le parti de décrire, dans un premier temps, les enjeux des recherches sur la visibilité routière (chapitre 2), avant d'apporter des éléments de réponse en suivant les trois approches complémentaires de notre démarche (chapitre 3) : Voir, Regarder, et construire des Images « réalistes ». Nous décrivons ainsi notre approche de la détection visuelle en conduite automobile (chapitre 4), puis de la prise d'information visuelle en situation de conduite (chapitre 5). Nous abordons finalement la production et le contrôle d'images adaptées aux études sur la visibilité routière (chapitre 6). Nous concluons sur notre contribution à l'émergence de la visibilité routière comme problématique scientifique, en essayant de préciser les limites de nos travaux, les difficultés rencontrées et les principales perspectives scientifiques (chapitre 7).

Chapitre 2

Enjeux de la vision en conduite automobile

Quelles sont les questions scientifiques sur la vision en conduite automobile qui présentent des enjeux pour les pouvoirs publics et pour les praticiens ? Pour répondre à cette question, la littérature la plus pertinente est la littérature technique, par exemple les rapports des *Technical Comitees* de la CIE, plutôt que que la littérature scientifique (*AAP*¹ ou *TR-F* en sécurité routière, *JOSA*² ou *Vision Research* en vision, etc.).

Contrairement au génie civil dont les différentes disciplines se définissent par leur objet, la perception se définit par une relation entre un sujet et un objet [MP45]. Dans le domaine des ouvrages d'art ou des chaussées par exemple, les enjeux portent sur le dimensionnement d'un objet technique soumis à un ensemble de contraintes physiques, notamment la circulation. Dans le domaine de la perception, le dimensionnement des objets techniques (éclairage, signalisation) est certes soumis à des contraintes, mais nous ne nous sommes intéressés qu'à l'une d'entre elles, qui est sa relation avec un sujet humain : l'objet est perçu et interprété subjectivement, ou modifie la perception d'autres objets.

En se proposant de comprendre la perception que l'utilisateur de l'espace public a de son environnement dans le cadre de ses déplacements, on est amené à envisager non seulement la perception de tel ou tel objet manufacturé (équipement routier, infrastructure routière) mais aussi du « paysage » (alignement d'arbres, bâti, etc.), et surtout des autres usagers. Ces connaissances doivent permettre de fonder scientifiquement le dimensionnement et l'aménagement des espaces publics et de leurs équipements d'une manière qui tienne compte de la perception de cet environnement par les usagers.

Du point de vue des objets techniques et des métiers, l'éclairage public,

¹*AAP* : *Accident Analysis and Prevention*.

²*JOSA* : *Journal of the Optical Society of America*.

la signalisation horizontale et verticale, l'aménagement routier et urbain et la conception automobile sont concernés par des questions de perception. Nos recherches s'adressent indirectement à l'ensemble de ces professions. Elles ont vocation à être diffusées et à servir d'appui à la doctrine technique nationale ou internationale (normalisation, recommandations, guides techniques) : les Directions d'Administration Centrale (DRI, DSCR) et les Services Techniques Centraux (CERTU, SETRA, CETU³) du MEEDDM sont les principaux acteurs pour la formalisation de la doctrine technique nationale française. Au niveau international, la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) et le Comité Européen de Normalisation (CEN) sont les cadres principaux d'élaboration des documents normatifs. La diffusion des connaissances passe également par des outils et des méthodes proposés aux acteurs de terrain, et notamment aux maîtres d'ouvrage et à l'ingénierie publique, à travers les services déconcentrés du MEEDDM et les services techniques des collectivités territoriales, mais également les industriels et les équipementiers de la route et de l'automobile.

La CIE, organe scientifique international qui se donne notamment pour mission de produire des recommandations dans des domaines liés à la perception visuelle, reflète la pluri-disciplinarité de ce champ scientifique, à la fois par son découpage en Divisions⁴ et par la multiplicité des origines de ses membres. Les Divisions 2 (*Measurement of light and radiations*) et 4 (*Lighting and signalling for transport*) recouvrent l'essentiel des missions du RST⁵ sur la perception visuelle dans les espaces publics. La Division 4 décrit ainsi son domaine d'activité : « *Etudier l'éclairage et la signalisation visuelle, les besoins en information pour les transports et la circulation, tels que l'éclairage des routes et des véhicules, le marquage, les panneaux de signalisation et la signalisation pour tous les types de routes publiques ainsi que pour tous les types d'usagers et de véhicules, et les aides visuelles pour d'autres modes de transport que le transport routier* ». De son côté, la Division 8 (*Image technology*) aborde les questions de qualité visuelle des images [New99].

2.1 Enjeux de politique publique

Afin de clarifier les enjeux de politique publique des recherches sur la perception visuelle dans les déplacements, nous avons d'une part consulté un ensemble d'acteurs pertinents au LCPC, à l'INRETS, à la DSCR, au CERTU, dans les CETE et à l'AFE, d'autre part des documents techniques

³CETU : Centre d'Etude des Tunnels.

⁴La CIE est divisée en 7 Divisions. 1 : « Vision et couleur » ; 2 : « Métrologie de la lumière » ; 3 : « éclairage intérieur » ; 4 : « éclairage et signaux dans les transports » ; 5 : « éclairage extérieur » ; 6 : « photobiologie et photochimie » ; 8 : « technologie des images ». La Division 7 n'existe plus.

⁵RST : Réseau Scientifique et Technique du MEEDDM.

de référence [SET92, CER94, DRA02, AFE02, CIE81, CIE93, CIE92a, CIE92b, CIE95, CIE00b, CIE00a, AIP08] ainsi que les conclusion du groupe « Recherche » du « Grenelle de l'Environnement » [MEE08d]. Les enjeux recensés participent à trois grands domaines des politiques publiques : la sécurité routière, le développement durable et la sécurité des biens et des personnes (Cf. aussi [Bré04]).

2.1.1 Sécurité routière

La prise d'information visuelle de l'utilisateur de la route est traditionnellement envisagée, d'une part sous l'angle de la visibilité des éléments significatifs pour la tâche de conduite (chaussée, signalisation, autres usagers, etc.), d'autre part sous l'angle de la lisibilité de la route, c'est-à-dire de la compréhension par l'utilisateur du bon usage de la route. Du point de vue de l'infrastructure, le concepteur et le gestionnaire disposent essentiellement de trois outils : la signalisation (horizontale et verticale), l'éclairage public, et l'aménagement (routier ou urbain), tandis que l'autorité publique peut jouer sur la réglementation locale (e.g. stationnement, vitesse réglementaire) et à un niveau supérieur, sur le code de la route.

Malgré la qualité des travaux de recherche (e.g. [Hil80, Pot00, dLDT01, CB01]), les connaissances sur les processus réels de perception visuelle en conduite et sur leur impact sur le comportement (et en particulier sur les processus d'accidents) sont encore très limités. De plus, le transfert des résultats des recherches au niveau opérationnel est en soi une question ouverte.

Le document de référence en France sur la sécurité routière pour les agents de l'État et des collectivités territoriales reste l'ouvrage « Sécurité des routes et des rues », qui date tout de même de 1992 [SET92]. Il donne l'état des connaissances à destination des aménageurs, notamment sur les notions de visibilité et de lisibilité⁶. La signalisation, et surtout l'éclairage public, y sont considérés comme des équipements dont l'impact sur la sécurité est relativement secondaire. Le rapport sur les « gisements de sécurité routière » publié par la DRI en 2002 [DRA02] fait ressortir des enjeux liés à la perception visuelle. En termes de besoins de recherche, quatre domaines sont jugés prioritaires :

- La compréhension du rôle de l'infrastructure dans les mécanismes d'accidents (principalement en milieu interurbain) ; le projet VIZIR que nous avons piloté pour le PREDIT entre 2005 et 2009 visait à résoudre certains aspects de cette question (diagnostic de la visibilité sur itinéraire, impact de l'aménagement sur le comportement en haut de côte et en carrefour inter-urbain).
- la compréhension de la perception visuelle en situation de conduite

⁶La définition de ces notions n'est pas stable dans le document.

(vision, représentation et perception du risque). Les travaux que nous avons mené avec M. Deugnier, L. Simon et J.-P. Tarel sur la saillance des objets routiers (notamment la signalisation) contribuent à cet enjeu.

- la vision de nuit et dans le brouillard (pour améliorer l'éclairage et la signalisation, et indirectement la vigilance). Les travaux menés avec A. Mayeur sur l'éclairage public contribuent à cet enjeu. De même, en amont, les travaux sur le calcul (avec G. Gallée) et le rendu des images de synthèse (avec F. Viénot, E. Dumont, J. Grave et J. Petit) pour présenter, sur simulateur de conduite, des images de synthèse plus crédibles en conditions de visibilité dégradée.
- Les véhicules « communicants ». Nos travaux ne contribuent pas à cet enjeu en raison des missions du LCPC centrées sur la contribution de l'infrastructure routière à la sécurité (la création du LEPSiS en 2009 a toutefois changé la donne, et plus encore la fusion prochaine du LCPC et de l'INRETS).

La pluie est identifiée comme présentant un sur-risque d'accident important et stable. Les recherches ont négligé jusqu'ici la gêne visuelle que représente la pluie, ainsi que les représentations des usagers concernant la conduite sous pluie. Le projet WET (PCRD) sur la simulation de la pluie devait contribuer à cet enjeu, en permettant des études plus fiables sur simulateur de conduite sous pluie ou sur route mouillée⁷. Enfin l'utilisation des feux de croisement de jour semble efficace sur le plan de la sécurité routière [Las02] mais ne fait pas l'objet d'un consensus en France. Le risque est que les usagers les plus vulnérables (piétons, deux roues) soient moins visibles, mais l'état des connaissances ne permet pas de trancher. Ici aussi, des images de synthèse réalistes sur le plan perceptif seraient utiles⁸, et nous avons proposé d'évaluer la qualité visuelle des images et des vidéos en termes de saillance visuelle [PBT09a, BTDH].

2.1.2 Développement durable

Le Grenelle de l'environnement [Sar07] a fait de la question du développement durable un enjeu accru des politiques publiques, tout en identifiant des besoins de recherche [MEE08d]. Le « pilier environnemental » du développement durable traite à la fois des économies d'énergie liées à l'éclairage public et au balisage lumineux, et de la notion de « nuisances lumineuses » [Rem03, LR03]. Notre contribution à ces questions est restée

⁷Une première version de ce projet a été rejetée par le PCRD en 2009, une nouvelle version est en cours de rédaction pour un dépôt prévu en 2010.

⁸Nous avons été récemment contactés avec J. Petit par le TU Dresde qui travaille, dans le cadre du Projet européen 2BeSafe, sur la saillance visuelle des deux roues. La demande concerne l'utilisation des images de synthèse développées dans le cadre de la thèse de J. Petit [PBV09] sur leur simulateur de conduite.

limitée jusqu'ici [Jan01, Bré02a], en collaboration avec l'AFE.

Un autre enjeu important concerne la modélisation et la simulation de la ville, que nous abordons au niveau de la simulation du trafic urbain (cet enjeu est particulièrement important dans le cadre du pôle de compétitivité *AdvanCity*). Les modèles de simulation actuels des piétons [TRM07] ne permettent pas de rendre compte fidèlement des interactions piétons-conducteurs [TAB08], et le projet SICAP (en cours) a pour objectif d'améliorer la modélisation des piétons dans un contexte urbain, notamment du point de vue perceptif (prise d'information visuelle, visibilité, saillance).

2.1.3 Sécurité des biens et des personnes

La sécurité des biens et des personnes est une problématique qui intéresse le ministère de l'Intérieur, et qui présente une composante urbaine (aménagement urbain, éclairage public) pour laquelle les connaissances sur la perception visuelle sont encore discutables et discutées [Mos07]. Cet enjeu ne relève pas de la compétence du LCPC et n'est pas abordé ici.

2.2 Prise d'information visuelle en conduite

On distingue classiquement trois aspects de la tâche de conduite, de priorité décroissante pour le conducteur. Pour la CIE ce sont le positionnement latéral du véhicule sur la chaussée, le positionnement dans le trafic, et la navigation [CIE92b]. Dans le modèle de Allen, ce sont les aspects opérationnel, tactique et stratégique de la conduite [ALA71]. Quelle que soit la classification, le contrôle visuel est le principal canal sensoriel utilisé à chaque niveau [Siv96]. Les tâches visuelles sont à la fois directes (détection, reconnaissance des « éléments visuels », guidage visuel) et indirectes (attention, prise de décision [Ber03]). La signalisation et l'aménagement urbain ont donc un rôle essentiel, de jour comme de nuit, pour faciliter la tâche de conduite.

Les outils de diagnostic de la visibilité sont peu développés par rapport à ce qui existe par exemple pour l'adhérence routière. Cela peut s'expliquer, d'une part, par la faiblesse des modèles actuels de visibilité routière par rapport aux modèles physiques d'adhérence, mais aussi parce que l'impact de la visibilité sur la sécurité est plus complexe. En effet, la perception permet d'anticiper une trajectoire sûre [GC38, Neb74], mais implique des représentations mentales et des réactions humaines plus difficiles à modéliser que la relation physique entre l'adhérence mesurée et la perte d'adhérence. La relation entre visibilité routière et risque d'accident est une question qui est loin d'être élucidée.

Bien que des matériels spécifiques existent pour mesurer certains as-

pects de la visibilité⁹, les praticiens restent demandeurs d'outils de diagnostic de la visibilité et de la lisibilité routière¹⁰. Le besoin principal est l'amélioration des connaissances sur le comportement réel des usagers de la route, sur tous les aspects de la prise d'information visuelle : détection de cibles [CIE81, MP04], saillance visuelle [CIE00a, LM03], stratégie visuelle [LL94], compréhension et représentation de l'environnement [BMM⁺97], attentes associées [Mos00]. Le Projet PREDIT VIZIR déjà cité a abordé la question du diagnostic de visibilité sur itinéraire au moyen de véhicules instrumentés, pour la visibilité du tracé [BT07, TBC08] comme pour la visibilité nocturne [BCDG07]. La thèse de L. Simon¹¹ au LEPSiS a abordé le diagnostic de la saillance visuelle des panneaux routiers par des méthodes d'analyse d'image [STB09]. Pour notre part, Nous avons abordé des aspects liés à la détection visuelle principalement par le biais de l'éclairage public et automobile, donc de nuit (section 2.3 et chapitre 4), et la prise d'information proprement dite à travers la question de la saillance visuelle (section 2.4 et chapitre 5). Une originalité de notre approche est d'avoir mis au premier plan des enjeux le développement des images réalistes destinées aux recherches sur la visibilité routière (section 2.5 et chapitre 6).

2.3 Eclairage public et automobile

Le lien entre éclairage public et sécurité routière est une question récurrente, sur laquelle les connaissances sont parcellaires [CIE92b, Wan09]. Les besoins de recherche concernent l'impact de l'éclairage sur le comportement des usagers (vitesse, anticipation, vigilance, etc.), afin de proposer des méthodes de dimensionnement et d'évaluation ayant une meilleure base scientifique. L'utilisation de simulateurs de conduite pour étudier ces questions est possible dans certains cas [BD02], avec toutefois des questions ouvertes sur le réalisme perceptifs des images de synthèse. Le partage de la voirie pose également des questions dans le cadre des opérations de réaménagement des voiries urbaines conçues dans les années 1960 et 1970 sur le mode routier, et pour lesquelles l'éclairage a longtemps été traité en parent pauvre [Bré07a].

Le Grenelle de l'Environnement a fait des questions d'économie d'éner-

⁹Par exemple Ecodyn, développé au LRPC de Strasbourg pour mesurer la rétro-réflexion du marquage, Visuline, développé au LRPC de Saint Briec pour mesurer la distance de visibilité, Veclap, développé au LRPC de Rouen pour mesurer des éclaircissements en continu, etc.

¹⁰Les pratiques actuelles d'aménagement raisonnent essentiellement de jour et par temps clair, l'éclairage public étant conçu comme une rustine palliant la mauvaise visibilité la nuit. Une note de JP Gastaud, IGPC, Président du GNCDS, mentionnait en 2003 comme première préoccupation au niveau des études « la visibilité, la perception et la lisibilité de la route » [Gas03].

¹¹Thèse de l'Université Paris VI (dir. J. Devars), encadrée au LCPC par J.-P. Tarel.

gie, y compris pour l'éclairage, un axe majeur [MEE08f]. Dans le secteur du bâtiment, il existe par exemple un label HQE¹² permettant de qualifier un bâtiment selon des critères environnementaux, notamment en termes énergétiques et de nuisances ; il n'existe pas d'équivalent à ce jour ni pour l'éclairage public, ni pour la conception des routes.

Dans le domaine routier, des connaissances sur la photométrie des chaussées sont nécessaires pour réaliser un dimensionnement adéquat de l'éclairage public. Or la classification actuelle des chaussées semble périmée par rapport aux revêtements français usuels. En outre, les connaissances sur l'évolution dans le temps des propriétés photométriques des revêtements pourraient conduire à proposer des méthodes de réception des installations d'éclairage qui tiennent compte de cette évolution [Dum07].

Depuis une quinzaine d'années, la notion de nuisance lumineuse a émergé dans les préoccupations publiques [CIE97, MEE08a]. Elle recouvre plusieurs types de conséquences négatives de l'éclairage public et privé : le halo lumineux au-dessus des villes qui gêne les astronomes, les conséquences de l'éclairage sur les animaux et les plantes qui inquiètent les écologistes, l'intrusion de la lumière dans les habitations, la modification des rythmes biologiques humains soumis à une exposition prolongée à la lumière¹³. Les professionnels de l'éclairage font ainsi face à une évolution de la société qui est moins sensible aux bienfaits du « progrès », et prête plus d'attention à ses effets indésirables. Sur la plupart des sujets cités, les connaissances sont largement insuffisantes.

L'éblouissement causé par les projecteurs automobiles pose un problème de sécurité routière [BH01, Vos03, MGP⁺01]. L'évolution actuelle des technologies, centrées sur le confort de conduite, voit augmenter la puissance des projecteurs avec une réglementation qui n'est peut-être plus adaptée. L'usage des feux de croisement de jour par les automobilistes [Las02] est une mesure controversée (Cf. *supra*, [DRA02]), sur laquelle on manque de connaissance concernant une baisse éventuelle de la visibilité des autres usagers (motards, piétons, cyclistes). En rase campagne, la connaissance des propriétés photométriques des chaussées a une importance en termes de visibilité nocturne, les chaussées étant éclairées par les projecteurs des véhicules [BCDG07]. De plus, la conception de l'éclairage automobile et de l'éclairage public sont actuellement indépendantes l'une de l'autre [Bré06c]. Les questions d'éclairage public et automobile sont abordées au chapitre 4.

¹²HQE : Haute Qualité Environnementale.

¹³La production de mélatonine, hormone sécrétée par l'organisme, est stimulée par l'exposition à la lumière. Cette hormone est impliquée dans le contrôle du cycle circadien.

2.4 Lisibilité de la route

On désigne par cette expression le fait que les usagers sont capables, à partir de ce qu'ils voient, d'anticiper le fonctionnement de l'espace public et les risques associés (déplacements des autres usagers, vitesses pratiquées, réglementation) et donc d'adapter leur conduite de manière à minimiser les risques. Les principaux enjeux de la lisibilité de la route concernent l'organisation de l'espace public, notamment au travers des aménagements routiers et urbains, et l'évaluation de la qualité de service de la signalisation. Ces enjeux concernent essentiellement les aménageurs, que ce soit dans la définition des projets ou dans le réaménagement de sites existants. La simulation de conduite et les expérimentations en laboratoire (vidéo, images de synthèse) sont des moyens d'évaluation privilégiés des aménagements, à condition que les images soient suffisamment « réalistes ». Une approche que nous avons commencé à aborder passe par la modélisation de la perception dans le trafic urbain, permettant de simuler le fonctionnement urbain au niveau « microscopique » des acteurs (piétons, deux roues, véhicules de tourisme, poids lourds, etc.) dans des situations critiques comme les carrefours urbains et les entrées de ville afin d'observer l'émergence macroscopique du trafic simulé.

Actuellement, le principal constat est la carence de critères fiables permettant d'estimer la lisibilité de la route, ce qui légitime les recherches sur l'activité visuelle des usagers, sur leur stratégie de prise d'information en fonction de l'environnement physique (bâti, signalisation, autres usagers, etc.) et sur la signification donnée à l'environnement perçu (en termes d'attentes ou de comportement). Le développement d'outils de diagnostic de la crédibilité de la signalisation participe de cette problématique.

La signalisation temporaire, et notamment la signalisation de chantier, constitue un enjeu pour la sécurité mais aussi pour la gestion du trafic¹⁴. Dans ce domaine, les expérimentations paraissent difficiles, ce qui fait de la simulation un outil intéressant. Plus largement, cette question soulève le problème de la lisibilité de la route pour des usagers dits « pendulaires », qui ont un comportement routinier lié à leur connaissance du trajet [Ras83]. Une modification de la configuration physique doit être identifiée par tous les usagers, et la signalisation temporaire doit aussi être lue par cette catégorie d'usagers.

Des travaux menés dans le cadre du projet VIZIR ont permis de montrer, sur un simulateur de conduite, l'effet de différents aménagements routiers en haut de côte sur les trajectoires des automobilistes [RABP08]. Les recherches programmées dans le cadre du projet SICAP ont pour but de répondre à un autre aspect de cette question : comment se fait la prise d'in-

¹⁴Cf. par exemple le Comité Technique C.1.4 de l'AIPCR : Aménagements en faveur de la sécurité sur les chantiers routiers.

formation visuelle des piétons lors d'une traversée en carrefour urbain ? Ces travaux doivent contribuer à la modélisation informatique du trafic urbain, qui constitue un outil d'étude d'impact de l'aménagement urbain.

Nous avons toutefois peu abordé les questions liées à la lisibilité dans nos recherches jusqu'ici, dans la mesure où elles touchent principalement aux représentations mentales, donc des processus cognitifs plutôt que perceptifs. Nos contributions, à l'interface entre perception et cognition, sont présentées au chapitre 5. Elles concernent la saillance visuelle de l'environnement routier, et plus généralement la question de la prise d'information dans les déplacements (qu'est-ce qu'on regarde ?).

2.5 Un outil : les images de synthèse

Plutôt que l'étude directe des comportements sur la route, la psychologie expérimentale privilégie les études de laboratoire, y compris sur simulateur de conduite [BEC07]. Le principe de ces études consiste à présenter des stimuli visuels à des observateurs, en contrôlant les conditions (Cf. par exemple les travaux de Rogé sur le champ visuel utile [Rog02, Rog03a, Rog03b], ou ceux de Snowden sur la perception des distances dans le brouillard [SSR98]). Malgré des réserves anciennes mais toujours valables [Sar36], la méthode expérimentale s'est imposée en sciences humaines [Ber65] grâce au contrôle des variables et à la possibilité de répliquer les résultats, et donc de tester statistiquement des hypothèses explicites concernant les variables manipulées.

Dans les recherches en vision, le contrôle des stimuli devient celui des images : calcul d'images de synthèse ou acquisition d'images par des capteurs, et visualisation de ces images. Pour étudier la visibilité routière, la modélisation et la visualisation des images routières doivent donc être fidèles aux scènes représentées.

Un premier aspect du contrôle de la « qualité » des images concerne le contrôle des propriétés photométriques et colorimétriques des images affichées, donc du système de visualisation (écran ou projecteur CRT, LCD, DLP, etc. [CIE96, RBBC07]). Mais l'essentiel des enjeux pour la recherche porte sur le calcul des images en unités physiques (calcul spectral de la propagation de la lumière [DCWP02], puis calcul d'image en luminance et en chrominance), et sur la prise en compte des artefacts des systèmes de visualisation, notamment par des techniques de *tone mapping* [RWPD05]. Nous abordons ces questions, respectivement, aux sections 6.1 et 6.2.

L'essentiel des connaissances sur la perception visuelle provient de recherches fondamentales en psychologie expérimentale et en neurosciences [Wan95, Rod03]. Elles ont été réalisées dans des conditions « de laboratoire », très éloignées de la situation de conduite. Pour comprendre la perception lors d'une tâche particulière comme la conduite, il est pourtant né-

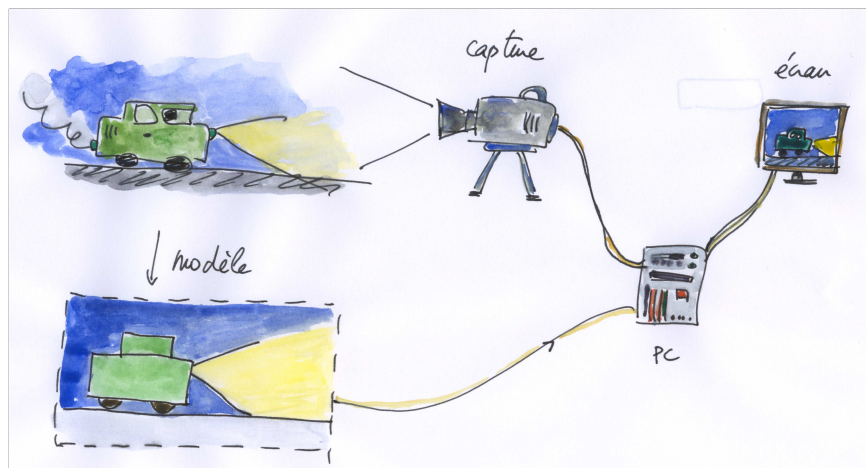


FIG. 2.1 – Le problème de la visualisation des images : acquisition par un capteur, ou modélisation de la scène et simulation de la propagation de la lumière, enfin visualisation sur écran.

cessaire de se rapprocher d'une situation « écologique » [Gib79], de manière à connaître les biais que représente la situation de laboratoire, et procéder à des expérimentations complémentaires permettant de décrire la perception « en situation » [Hoc01]. Une des approches les plus séduisantes est la simulation de conduite, mais elle pose un grand nombre de question concernant le « réalisme » perceptif des images de synthèse utilisées [KP03] (Cf. aussi [Bré02b, Bré05, Bré07b, BEC07]).

Nous proposons aux sections 5.2 et 5.3 plusieurs approches pour évaluer et améliorer la qualité des images du point de vue de leur perception. Nous abordons à la section 6.1 le calcul des images de synthèse, et à la section 6.2 le problème de la visualisation sur écran de ces images.

2.6 Besoins de recherche

Pour les acteurs de terrain, la clarification du vocabulaire de la perception nous a semblé être un préalable important. Il ne s'agissait pas de trouver la « bonne » définition de termes comme « visibilité », « saillance », « éclairage », « attention », mais de proposer un sens partagé qui ait un intérêt pour les professionnels de la route, donc en relation avec les problèmes opérationnels (Cf. notre proposition de vocabulaire dans [Bré07e]).

En termes d'outils pour les praticiens, les besoins prioritaires concernent les outils de diagnostic de la visibilité des usagers (piétons, deux roues, automobilistes, etc.), et les outils de diagnostic de la pertinence de la signalisation. Réciproquement, à partir des verrous scientifiques identifiés pour les

politiques publiques citées, nous avons identifié trois questions centrales :

1. Qu'est-ce que les gens sont capables de **voir** lorsqu'ils conduisent ?
2. Qu'est-ce que les gens **regardent** lorsqu'ils conduisent ?
3. Quelles **images** permettent d'étudier (1) et (2) par les méthodes de la psychologie expérimentale ?

Il va de soi que nous n'avons abordé qu'une faible partie du champ de recherche esquissé ici. Nous présentons dans ce qui suit nos travaux sur la détection visuelle (qu'est-ce que les automobilistes voient?) principalement dans le cadre des problématiques d'éclairage public (chapitre 4), et la prise d'information routière (qu'est-ce qu'ils regardent?) à travers la saillance visuelle des objets routiers (chapitre 5). Dans chaque cas, les images sont des moyens d'étude incontournables, et nous abordons aussi pour eux-mêmes le calcul et la visualisation d'images adaptées aux études de visibilité routière (chapitre 6). Cela concerne le calcul d'éclairage physiquement réaliste pour les images de synthèse, l'adaptation de ces calculs aux bases de données pour la simulation de conduite, et la visualisation des images de synthèse à l'aide d'opérateurs de *tone mapping* (TMO¹⁵). Ces développements contribuent à la qualité des images pour la simulation de conduite, de même que nos travaux sur l'amélioration de la prise d'information visuelle par les agents simulés *dans* les simulations et ceux sur l'évaluation de la qualité des simulateurs du point de vue de la prise d'information visuelle.

¹⁵TMO : *Tone Mapping Operator*.

Chapitre 3

Démarche : des images de synthèse à la psychologie cognitive

3.1 Questions de recherche : voir / regarder la route

Nous proposons dans les chapitres suivants des éléments de réponse aux questions soulevées au chapitre 2. La présentation du document est structurée en essayant de tenir compte, autant que faire se peut, de notre double approche, à la fois en termes de questions scientifiques et d'applications :

1. Visibilité en conduite automobile (chapitre 4) :
 - Analyse d'images : comment calculer la visibilité des objets sur des images routières ? (section 4.1).
 - Photométrie : Comment aider le gestionnaire routier à faire le diagnostic de la visibilité nocturne sur son réseau ? (section 4.2)
 - Ergonomie : Comment dimensionner l'éclairage routier pour améliorer la sécurité routière ? Quelle est la pertinence des méthodes de dimensionnement actuelles ? (section 4.3).
2. Prise d'information visuelle dans les déplacements (chapitre 5) :
 - Psychologie cognitive : Qu'est-ce que les automobilistes regardent en conduisant ? Qu'est-ce qui est saillant pour eux, en fonction de leur tâche de conduite ? (section 5.1.1).
 - Analyse d'images : Comment calculer la saillance des objets routiers dans les images ? (section 5.1.2).
 - Vision : Quels sont les biais des simulateurs de conduite dans la prise d'information visuelle ? (section 5.2).
 - Intelligence artificielle : Comment simuler la perception des automobilistes et des piétons pour la simulation microscopique du trafic ? (section 5.3).

3. Des images pour les recherches routières (chapitre 6) :
 - Synthèse d’images : Comment produire des images de synthèse fidèles aux scènes modélisées, du point de vue photométrique et colorimétrique ? Comment produire ces images en temps réel pour une utilisation en réalité virtuelle ? (section 6.1).
 - Rendu des images : Quelles méthodes de visualisation des images de synthèse pour la simulation de conduite, et pour les expériences psycho-visuelles ? Comment évaluer la qualité des images affichées ? (section 6.2).
 - Perception des images : Qu’est-ce que la « qualité » d’une image ? comment la mesurer ? quels sont les critères possibles ? (section 6.3).

3.2 Deux approches successives

Dans un premier temps, nos travaux se sont organisés à partir d’un champ disciplinaire : les images de synthèse, et d’un objet d’application : l’éclairage public (Fig. 3.1). Le support de ces travaux était le logiciel de calcul d’éclairage Lise-LCPC¹. L’objectif était de simuler les échanges d’énergie lumineuse dans des scènes virtuelles par des méthodes de radiosité [SP94], en respectant à la fois la photométrie et la colorimétrie des surfaces et des sources lumineuses². Il s’agissait principalement d’un travail d’ingénierie : développement d’une nouvelle version du logiciel de calcul (radiosité hiérarchique), transfert sous Linux [Bré00a], validation [Bré02d] et ajout de nouvelles fonctionnalités [Bré02a].



FIG. 3.1 – Première approche : utiliser les images de synthèse dans des problématiques d’éclairage public.

En termes de recherche, nous nous sommes intéressés à certaines limites des images de synthèse pour le rendu visuel de l’éclairage public : le rendu des textures, qui n’est pas pris en compte habituellement dans les calculs de radiosité [Lay97, Bou00], et le rendu temps réel pour la simulation de

¹LISE-LCPC : logiciel développé au LCPC au début des années 1990 par C. Brusque [BNCL91, BCNL92], contemporain de *Radiance* [WS98].

²Cette approche bénéficiait des capacités de mesure du Laboratoire de Photométrie du LCPC [HCR93].

conduite [Bré03a]. La démarche retenue, en collaboration avec un industriel (Oktal S.A.), consistait à intégrer l'éclairage public dans des bases de données simulées par un pré-calcul de radiosité.

Ces travaux, notamment [Bou00] et [Bré02d], ont posé la question du « réalisme » des calculs d'éclairage [Fer03], ce qui nous a orienté vers les modèles de vision humaine [Wan95]. En effet, même si les modèles de calcul utilisés visent à reproduire la physique de la propagation de la lumière, c'est du point de vue de la perception visuelle que l'évaluation du résultat (les images calculées) est la plus pertinente [MRC⁺86]. A partir de cette question du réalisme perceptif, nous avons intégré les images comme outil majeur pour l'étude de la visibilité routière (Fig. 3.2).

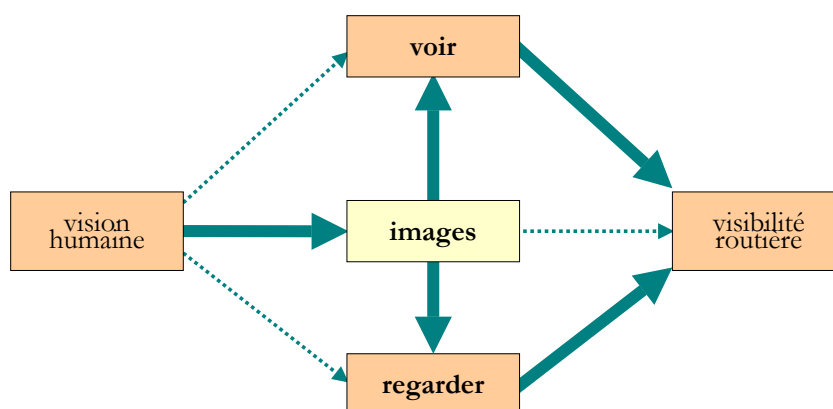


FIG. 3.2 – Seconde approche : Les images sont des intermédiaires pour étudier la visibilité (qu'est-ce qu'on voit?) et la lisibilité routière (qu'est-ce qu'on regarde?). Les fondements théoriques proviennent des modèles de vision humaine.

La perception des images de synthèse par des observateurs (dans des expériences psycho-visuelles, ou sur simulateur de conduite) est ainsi devenue une question centrale de nos recherches, pour laquelle les modèles de vision humaine (e.g. [Pel95, Fai05]) constituent des outils adaptés. Algorithmiquement, le sujet central est le *tone mapping* : comment visualiser des images calculées en unités physiques (luminance, chromaticité) sur des écrans 8 bits ayant une faible dynamique de luminance ? Sur le plan de la perception, la question est celle des critères de jugement : selon quels critères juger de la qualité des images affichées à l'écran ?

Nous avons considéré les images comme des outils privilégiés permettant d'étudier la visibilité routière. Mais nous nous sommes également intéressés directement aux questions sur la visibilité posées par les praticiens, comme celle du dimensionnement de l'éclairage public, et plus généralement de l'aménagement visuel de la route, en essayant de comprendre

l'écart entre les modèles de calcul issus du « laboratoire » (e.g. le Niveau de Visibilité [Adr89]) ou du traitement d'images (e.g. le calcul de la saillance [IKN98]) et les performances réelles des usagers de la route. L'ergonomie, branche de la psychologie qui est centrée sur l'activité humaine, a été privilégiée comme cadre théorique, avec les méthodes de la psychologie expérimentale.

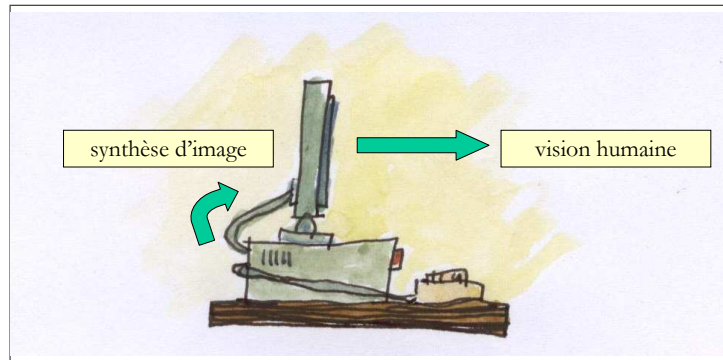


FIG. 3.3 – Faire le tour de l'écran : du calcul d'images de synthèse à la perception visuelle des images.

On peut décrire le passage de la première approche (Fig. 3.1) à la seconde (Fig. 3.2) en remarquant que nous avons fait le tour de l'écran, pour passer de la synthèse des images routières à l'observation de ces images (Fig. 3.3), et finalement, de la route.

Chapitre 4

Détection en conduite automobile

Le premier axe de nos recherches concerne la détection en situation de conduite. Notre contribution porte principalement sur l'éclairage, que nous abordons à partir de la notion de *niveau de visibilité* telle qu'elle est définie en éclairage public [Adr89]. Nous avons cherché à utiliser, évaluer et améliorer les modèles de dimensionnement et de diagnostic, en partant des modèles de référence qui sont principalement issus de la psychophysique (e.g. [Bla46]).

Le support principal de ces travaux est l'utilisation d'images et de vidéos calibrées photométriquement, permettant d'étudier des performances visuelles en contrôlant le « signal visuel », ce qui est illustré Fig. 4.1.

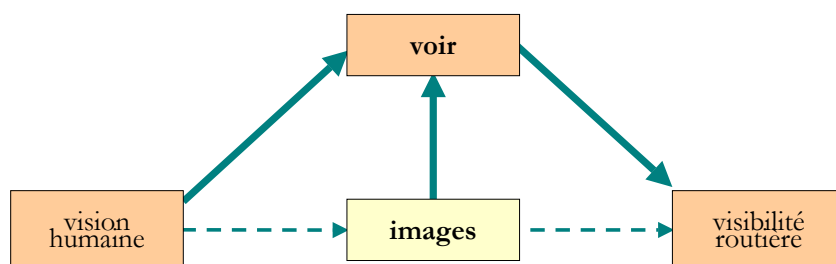


FIG. 4.1 – Performances de détection en conduite automobile : de la vision à la sécurité routière, en passant par les images.

En amont de ces travaux, nous pouvons également mentionner des recherches préliminaires sur les causes physiques de la réduction de la visibilité routière sous pluie [HDBL09b, HDBL09a], travaux menés dans le cadre du projet ANR DIVAS, mais qui doivent également contribuer au projet européen WET sur le rendu visuel de la pluie sur simulateur de conduite

(projet en cours de re-définition).

Si la détection de cible fait l'objet de recherches importantes, c'est que dans la séquence classique du traitement de l'information en psychologie cognitive, elle représente la première étape et donc conditionne les autres aspects de la perception (lecture, compréhension, etc.). Cette situation a même conduit à ne considérer en éclairage public que cette seule tâche de détection pour aborder le dimensionnement des installations. Cela revient à privilégier la détection comme tâche visuelle fondamentale en conduite automobile, considérant qu'elle permet une alerte anticipée en cas d'obstacle inattendu, et donc une réaction plus appropriée du conducteur.

Le principal modèle théorique permettant de prédire la détection d'une cible utilise la notion de niveau de visibilité (*VL* pour *Visibility Level*) [CIE81, ADR89]. Le *VL* est calculé, sur la base d'un grand nombre de données psychophysiques, à partir de la luminance d'adaptation, de la luminance et de la taille de la cible (supposée plane et uniforme), de la polarité du contraste, du temps de présentation, et enfin de l'âge de l'observateur. L'utilisation d'un tel modèle pour le dimensionnement des installations d'éclairage implique de fixer un seuil minimal [AFE02] ou une valeur moyenne [IES00]. Ce seuil est appelé « facteur de terrain » (*field factor*), ce qui traduit le fait que c'est un coefficient fixé en fonction de la situation de conduite. Des valeurs ont été proposées pour ce seuil dans la littérature (entre 1.6 et 20 pour l'éclairage public), sans qu'un consensus n'ait émergé jusqu'ici [Bré07c]. Un enjeu important des recherches sur la visibilité nocturne porte donc sur le dimensionnement de l'éclairage public, qui peut se traduire par le *VL*, mais également par d'autres critères comme l'éclairement ou la luminance, qui sont également proposés dans les recommandations et normes destinées aux praticiens [IES00, AFE02, EN105].

Nos recherches s'appuient sur le besoin des praticiens d'adapter les modèles théoriques de visibilité aux situations routières. Nous avons utilisé plusieurs approches complémentaires :

- Une approche photométrique, avec E. Dumont, H. Choukour et Y. Guillard, nous a conduit à proposer aux gestionnaires routiers et aux équipementiers automobiles une méthode de diagnostic de la visibilité nocturne sur un réseau routier non éclairé.
- Une approche par analyse d'image. Nous avons contribué, avec N. Hautière et E. Dumont, à la proposition d'une méthode de calcul de la visibilité des objets présents dans les images routières.
- Une approche ergonomique, avec A. Mayeur et C. Bastien, nous a permis de discuter la pertinence du *VL* comme prédicteur de la visibilité routière, notamment par rapport à des facteurs (excentricité, activité de conduite, flux optique, etc.) qui ne sont pas pris en compte dans ce modèle standard.

Nous avons en outre proposé à la division 4 de la CIE une analyse de la littérature sur le dimensionnement de l'éclairage routier [Bré07c]. La lit-

térature scientifique et technique en éclairage public propose des modèles théoriques pour évaluer la qualité de l'éclairage public et nous avons distingué quatre niveaux hiérarchisés dans la définition d'un indicateur de qualité.

1. Le premier est fonctionnel : il s'agit de spécifier l'objectif principal de l'installation d'éclairage (la sécurité routière, la valorisation urbaine, etc.).
2. Le second niveau est la définition de la tâche visuelle considérée comme représentative par rapport à l'objectif précédent (la détection de cible, la lecture de panneaux, etc.).
3. Le troisième niveau consiste à rassembler des données psychophysiques ou comportementales permettant de modéliser les performances des usagers de la route pour la tâche visuelle sélectionnée (e.g. [Bla46]), et à fixer des seuils de performance (e.g. [Adr87]).
4. Enfin, le quatrième niveau consiste à définir une méthode de mesure reproductible des paramètres d'entrée du modèle, permettant ainsi de juger effectivement des performances d'une installation (e.g. [IES00]).

Les ingénieurs routiers sont ainsi contraints à des compromis entre le besoin de critères objectifs et de procédures standardisées, d'un côté, et un but hors d'atteinte, l'évaluation de la « qualité » de l'éclairage au sens des utilisateurs (automobilistes et piétons). Ces compromis expliquent en partie la variété des critères proposés dans la littérature.

Les besoins des praticiens nous ont également conduit, avec V. Ledoux et G. Paulmier, à travailler sur l'adaptation visuelle. L'évolution des technologies a vu les films prismatiques succéder aux films à micro-billes pour la rétro-réflexion des panneaux routiers. Les nouveaux films sont plus performants, au sens où ils renvoient plus de lumière dans la direction d'éclairage (lumière des phares rétro-réfléchi vers le conducteur). Toutefois, la question se pose d'une éventuelle gêne visuelle liée à cette technologie, du fait de l'inadaptation temporelle du système visuel. Nous nous sommes demandés s'il était nécessaire d'introduire un seuil maximum de performance pour cette classe de produits, afin d'éviter une baisse de performances visuelles due à une forme affaiblie de l'éblouissement d'incapacité [CIE02]. Une expérimentation psycho-visuelle préliminaire a été menée, en présentant à des observateurs des images de synthèses dynamiques (vidéos) dans des conditions photométriquement contrôlées, proches d'un scénario de conduite de référence. Les résultats obtenus n'ont pas permis de trancher la question [BLP05], mais ont ouvert des perspectives sur la notion de niveau d'adaptation visuelle, qui est mal définie, pour le calcul de la visibilité routière [Adr89] comme pour le calcul du rendu dans les images (Cf. section 6.2). Cette question a été reprise depuis par G. Paulmier au LEPSiS [Pau07, PDPB09].

4.1 Calcul du niveau de visibilité

Le calcul de la visibilité routière pose des questions liées au passage d'un modèle conventionnel comme peut l'être celui d'Adrian à la réalité de la mesure photométrique sur site, telle que peuvent la réaliser les praticiens lors de la réception d'une installation. Le modèle est (par définition) une simplification de la réalité : par exemple, les obstacles potentiels sur la route ne sont pas des carrés plats et uniformes [LKK99, LM03], la luminance d'adaptation n'est pas nécessairement la luminance de la chaussée, et cette dernière n'est pas uniforme (Cf. section 4.1.1).

Réciproquement, on peut s'inspirer du modèle d'Adrian pour calculer la visibilité d'objets routiers sur des images qui ne sont pas calibrées en luminance, en faisant des hypothèses fortes sur l'interprétation physique des images. En effet, lorsqu'il s'agit de comparer la visibilité de deux objets dans une image (deux marquages routiers, deux véhicules, etc.), cette interprétation physique des images, même simpliste, représente en réalité une avancée par rapport aux méthodes classiques en analyse d'image. Elle permet, à partir d'une interprétation photométrique des valeurs des pixels, de s'appuyer sur des modèles psychophysiques de la visibilité (Cf. section 4.1.2).

4.1.1 Contribution : Méthode de mesure de la visibilité routière

Du point de vue photométrique, le modèle d'Adrian considère une cible uniforme sur un fond uniforme, ce qui ne correspond jamais strictement à la réalité. A partir de l'expérience menée par A. Mayeur sur la piste expérimentale du CETE Normandie-Centre [MBB10a] (Cf. section 4.3.1), nous sommes en train d'analyser avec V. Ledoux et E. Dumont comment la méthode de mesure de la luminance du fond (moyenne de 4 points de mesure, luminance correspondant au contraste le plus élevé avec la cible, luminance au pied de la cible, etc.) modifie la valeur du VL calculé.

L'intérêt des données expérimentales sur la distance de visibilité recueillies au cours de cette expérimentation est que l'on dispose de performances visuelles (distance de détection) qui peuvent être comparées à la fois à la valeur conventionnelle du VL (telle qu'elle est calculée pour le dimensionnement, par exemple avec 10 minutes d'arc dans [IES00]), et à la valeur calculée à la distance effective de détection, comme l'avaient proposé Gallagher et Meguire [GM75]. Ces données nous ont permis de choisir la méthode de mesure de la luminance de fond qui conduit à la meilleure corrélation avec les performances de détection. Des trois méthodes testées, c'est la méthode « des 4 points » qui s'est avérée la mieux corrélée aux performances (distance de détection). Un autre résultat de cette analyse est la forte dispersion des performances visuelles individuelles, ce qui questionne la pertinence du VL pour rendre compte d'une performance de dé-

tection sur la route. Ce travail a été soumis à la revue *Lighting Research and Technology (LRT)* [BDLM].

4.1.2 Contribution : Calculs de visibilité sur des images routières

Dans [HTB07] nous avons proposé, avec N. Hautière et J.-P. Tarel, d'utiliser le *VL* pour évaluer la visibilité des contours dans une image routière. Cette approche est basée sur une analogie plutôt que sur une application directe du modèle psychophysique sous-jacent. C'est une méthode alternative à l'approche classique du filtre par hystérésis sur le gradient, pour définir la visibilité des contours dans une image. Bien que l'interprétation photométrique des images repose sur des hypothèses assez fortes, elle présente un bénéfice qui est de permettre l'utilisation de modèles de vision humaine, en l'occurrence le *VL* et la Fonction de Sensibilité au Contraste (*CSF*¹).

Nous calculons d'abord un seuil de visibilité à partir de la *CSF* du système visuel humain et des caractéristiques du capteur. Puis, après extraction des contours dans l'image par une méthode classique (e.g. [MH80, Der87]), nous calculons une *DCT*² sur des blocs 8×8 de l'image des contours. Les coefficients de la *DCT* sont comparés aux seuils précédemment calculés pour chaque fréquence spatiale, ce qui permet de calculer un *VL* par bloc. Finalement, un filtre à hystérésis est appliqué sur les *VL* le long des contours. Cette approche par *DCT* a ensuite été comparée à une approche par Différence de Gaussiennes (*DoG*³) [HDB⁺09], piste qui doit être approfondie.

L'application proposée concerne les aides à la conduite, pour lesquelles un traitement temps réel des images routières peut permettre d'alerter le conducteur en cas de mauvaise visibilité, en particulier en fonction de sa vitesse. Nous avons également proposé une méthode de validation psychovisuelle de l'algorithme, afin de vérifier si les contours détectés comme visibles le sont effectivement (cette méthodologie n'a pas été mise en oeuvre à ce jour).

D'autre part, nous avons récemment contribué à un aspect de la thèse de R. Barbari (dir. N. Paparoditis, IGN) qui porte sur l'estimation par caméra de la visibilité météorologique. Notre contribution a principalement porté sur la formalisation d'un sous-problème, la distribution spatiale des objets Labertiens dans une image [BHD⁺10].

¹*CSF* : Contrast Sensitivity Function.

²*DCT* : Discrete Cosinus Transform.

³*DoG* : Difference of Gaussians.

4.2 Diagnostic de la visibilité nocturne

4.2.1 Contribution : Méthode de diagnostic de la visibilité nocturne

Dans le cadre du projet PREDIT SARI (thème VIZIR) [sar09], nous avons proposé avec H. Choukour un outil de diagnostic de la visibilité nocturne en l'absence d'éclairage public, basé sur un relevé de mesures photométriques sur itinéraire, et sur un calcul de visibilité inspiré de l'éclairage public (Modèle d'Adrian).

Ce travail a été présenté à la CIE (Div. 4) [BCDG07]. Nous avons proposé une méthode de diagnostic de la visibilité nocturne sur un réseau non éclairé (typiquement, la voirie secondaire gérée par un Conseil Général). Notre indicateur de la visibilité nocturne s'appuie sur le calcul du VL en tout point de l'itinéraire, à partir d'un scénario conventionnel : un véhicule isolé roule en phares, et une cible standard apparaît sur la chaussée à une distance fixée. Nous utilisons une base de données de photométrie de phares réalisée par l'Université du Michigan (UMTRI⁴), et une mesure en continu de la rétro-réflexion de la chaussée à l'aide d'un véhicule instrumenté (Ecodyn)⁵.

La faisabilité de la mesure a été démontrée sur des itinéraires de l'Essonne et des Côtes d'Armor, en collaboration avec les Conseils Généraux concernés dans le cadre du Projet VIZIR [CBD07]. Ces expérimentations ont permis de mettre en évidence la simplicité de mise en oeuvre avec du matériel existant. L'objectif était de présenter au gestionnaire routier les résultats sur une cartographie du réseau, exprimés dans un premier temps en VL , de manière à l'alerter sur les zones de moins bonne visibilité nocturne. Bien que les gestionnaires rencontrés se soient montrés intéressés par notre outil, une des limites de notre approche est que ce type de diagnostic semble difficile à intégrer aux pratiques actuelles des Conseils Généraux.

Dans un deuxième temps, nous avons proposé avec E. Dumont de calculer en tout point une distance de visibilité, en fixant le seuil de VL conventionnellement à 7 (valeur proposée par l'AFE [AFE02] sur la base des travaux de J. Lecocq [Lec91, LKK99]). Ce nouvel indicateur est plus parlant pour les gestionnaires routiers, qui ne sont pas des professionnels de l'éclairage, mais il intéresse également les équipementiers automobiles. En effet, bien que l'objectif initial de ces travaux soit un outil de diagnostic à destination des gestionnaires routiers, ils peuvent également trouver une application dans le développement des systèmes d'éclairage automobile (AFS, pour *Advanced Front-lighting Systems*), puisqu'en connaissant la photométrie du véhicule dans lequel on circule, on peut réaliser un calcul plus précis

⁴UMTRI : *University of Michigan - Transportation Research Institute.*

⁵Le véhicule Ecodyn a été développé par le LRPC de Strasbourg pour la mesure en continu de la rétro-réflexion des marquages routiers [CER00].

et adapter, par exemple, la puissance des feux automobiles en fonction du niveau de visibilité souhaité [DBH08].

Dans le cadre d'une collaboration franco-américaine (CalFrance), nous avons également intégré notre approche avec celle de l'Université de Berkeley (Californie) qui travaillait sur la mesure photométrique d'indicateurs de la baisse des performances visuelles dues à l'éblouissement automobile [BCDG09].

4.3 Approche ergonomique de l'éclairage public

Nous avons étudié avec A. Mayeur et C. Bastien différents aspects de la visibilité en conduite automobile qui ne sont pas pris en compte par le modèle d'Adrian, ni par les applications normatives qui en sont faites [IES00, AFE02]. L'objectif de la thèse d'A. Mayeur était de produire des connaissances utilisables par les praticiens sur la visibilité routière. Ce travail nous a permis de mieux cerner les limites du modèle standard, et a suggéré des pistes vers un modèle alternatif, plus prédictif de la visibilité réelle, tout en restant opérationnel pour les praticiens.

Ces recherches ont permis d'analyser en détail certains facteurs responsables de l'écart entre les performances de détection de cible en situation de conduite et les modèles psychophysiques de laboratoire utilisés dans le dimensionnement de l'éclairage public. L'approche ergonomique a permis de s'intéresser à différents facteurs spécifiques de l'activité de conduite, tels que l'excentricité de la cible, la tâche de conduite elle-même, et différents aspects du contexte (scène routière, dynamique temporelle). Le support principal de ces recherches est l'image, à travers les stimuli visuels contrôlés, notamment sur le plan photométrique.

4.3.1 Contribution : Effet de la tâche de conduite sur la visibilité

Dans une première expérimentation notre objectif était de savoir si l'ajout d'une tâche de conduite comme tâche principale modifie les performances visuelles de détection de cible en vision périphérique [MBB08a, MBB08c]. La motivation était de comprendre dans quelle mesure les modèles psychophysiques utilisés en éclairage public (vision centrale, tâche unique) étaient adéquats pour juger de la détection d'objets pendant la conduite. Pour cela, nous avons dû développer un logiciel très simple permettant de produire des images de synthèse dont les caractéristiques géométriques et photométriques étaient contrôlées.

L'expérimentation, en laboratoire, était divisée en trois phases (Fig. 4.2). Au cours de la première phase, deux groupes (« contrôle » et « expérimental ») devaient réaliser une tâche de détection périphérique sur écran (simple tâche), pour plusieurs excentricités et plusieurs contrastes. A partir des

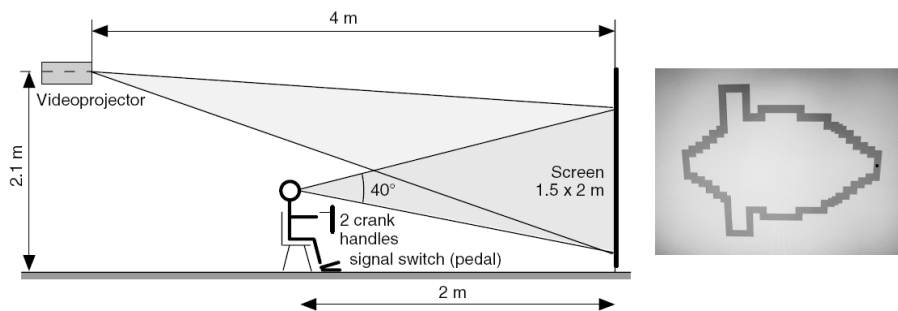


FIG. 4.2 – Principe d’une expérimentation destinée à montrer l’effet de l’activité sur les performances de détection de cible : dispositif expérimental dans la salle CLOVIS du LCPC (à gauche) et circuit présenté à l’écran (à droite).

résultats individuels, un seuil de détection individuel était calculé pour chaque sujet et chaque excentricité. Une tâche de poursuite consistant à diriger un mobile sur un circuit, à l’écran (Fig. 4.2, à droite), était demandée en phase 2 aux deux groupes. Cette tâche de poursuite était réalisée au moyen d’un logiciel dédié que nous avons développé spécifiquement pour l’expérimentation, et d’une manivelle prêtée par la RATP et utilisée par eux dans les tests psychotechniques d’embauche [Lah33]. En phase 3, le groupe « contrôle » réalisait la même tâche qu’en phase 2, alors que le groupe « expérimental » réalisait une double tâche, consistant en une tâche principale de poursuite et une tâche secondaire de détection périphérique.

Les résultats ont montré un effet de la tâche de poursuite et un effet de l’excentricité sur la performance de détection. Il en découle que le VL , considéré comme indicateur de la visibilité routière, peut être amélioré en prenant en compte les effets de la tâche (donc de la charge mentale) et de l’excentricité.

Parallèlement, il est apparu nécessaire de disposer de données expérimentales en conduite réelle. Dans le domaine de la visibilité routière, la situation la plus utilisée est la conduite sur piste fermée, à la fois pour des raisons de sécurité et pour mieux contrôler les variables par rapport à la conduite sur route. Ce type d’études a abordé dans les années 1970 et 1980 la mise au point d’un seuil de performance visuel [Hil75, BT86], et plus récemment les tests visuels pertinents pour la conduite [Woo02] et la technologie d’éclairage [ARB07], tandis que certains auteurs ont repris la question du *design* de l’éclairage public [MP04].

Dans notre cas, une expérimentation sur la piste d’éclairage du CETE Normandie-Centre nous a permis, en collaboration avec D. Lesbats et C. Poivert, de rechercher le lien entre VL calculé et distance de détection, dans une tâche de conduite simple [MBB10a]. Pour évaluer l’effet de l’activité



FIG. 4.3 – Véhicule expérimental et cible utilisés sur la piste d'éclairage du CETE de Rouen.

de conduite indépendamment des autres facteurs, nous avons comparé les performances des sujets (distance de détection des cibles) en condition « passager » et en condition « conducteur », pour les mêmes valeurs du *VL* (Cf. Fig. 4.3).

Nous avons pu montrer que même dans une tâche de conduite très simple (sans trafic, en ligne droite, à 40 km/h), les performances sont significativement diminuées par l'activité de conduite. Cette étude est complémentaire de la précédente, puisqu'elle montre que dans une tâche de conduite réelle, qui prend en compte l'ensemble des facteurs et non pas seulement ceux utilisés par le modèle d'Adrian, l'effet de la tâche de conduite est effectivement significatif, même pour une complexité très faible de la tâche, et donc une charge mentale minimale liée à cette tâche.

4.3.2 Contribution : Effet du contexte sur la visibilité

L'introduction du contexte de la scène routière (sémantique) et de la dynamique (flux optique) est possible dans une tâche de détection en laboratoire à l'aide de vidéos. Une seconde expérimentation de laboratoire a ainsi permis de mieux comprendre l'influence de la sémantique des images routières sur la détection de cibles sur la chaussée, ainsi que l'effet de la perception dynamique (flux optique) [MBB10b]. Des travaux antérieurs avaient déjà utilisé des vidéos routières pour évaluer la prise d'information visuelle en conduite (e.g. [CUC99]). Dans ces paradigmes expérimentaux, l'utilisation de techniques de suivi du regard est nécessaire du fait de l'importance du facteur *excentricité* dans les performances de détection.



FIG. 4.4 – Expérimentation au LCPC sur la prise en compte du contexte visuel dans la détection de cible. Au premier plan, l’oculomètre SMI iView RED-X.

De manière complémentaire à l’expérimentation en laboratoire sur l’activité de conduite (section 4.3.1), une expérimentation utilisant un système de suivi du regard a ainsi permis de mettre en évidence l’effet du contexte visuel sur la tâche de détection de cible (Fig. 4.4). Trois conditions étaient proposées aux sujets : une tâche de détection de cible sur fond uniforme, très proche de ce qui était proposé en Phase 1 de l’expérimentation précédente [MBB08a], une tâche de détection utilisant les mêmes cibles, mais qui apparaissent sur la chaussée, sur des images routières (Cf. Fig. 4.5) ; enfin une troisième condition dans laquelle les cibles se détachaient au même endroit sur la chaussée, mais sur fond de vidéo routière. Les contrastes étaient contrôlés grâce à une calibration photométrique du vidéo-projecteur [Pau06].

L’analyse statistique des données, réalisée avec H. Panjo, a permis de montrer que les deux facteurs étudiés, le fond complexe et la dynamique visuelle de la vidéo, ont un effet sur la tâche de détection de cible. Chacun de ces facteurs dégrade les performances, ce qui était déjà le cas de l’excentricité et de la tâche de conduite [MBB10b].

4.3.3 Contribution : Dimensionnement de l’éclairage public

Ces résultats sont concordants, et suggèrent que la conception de l’éclairage public doit au minimum tenir compte de plusieurs nouveaux facteurs pour fixer une valeur de performance photométrique comme le VL . C’est



FIG. 4.5 – Incrustation d’une cible conventionnelle dans une image routière en contrôlant le contraste affiché à l’écran, à l’aide d’un logiciel dédié développé par J.-P. Tarel au LEPSiS.

d’ailleurs, quoique sur des bases très empiriques, un aspect de la démarche de la norme européenne, mais qui ne traite que les variables d’éclairage et de luminance [EN105], qui ne sont pas directement reliées à la tâche de conduite.

Lors d’une communication à la SELF, nous avons pris du recul par rapport aux enjeux pour les praticiens de l’éclairage [MBB08b]. Partant de la conception de l’éclairage routier avec le modèle *STV*, nous avons montré les limites d’un modèle qui ignore l’activité de conduite dans la conception. Nous avons suggéré que la prise d’information visuelle et l’anticipation du conducteur doivent être pris en compte pour améliorer la conception de cet objet technique.

Nous pouvons qualifier notre approche jusqu’ici de « pas à pas », permettant une discrimination des facteurs les plus importants dans la vision en conduite nocturne [CIE92b] dans le but de proposer un meilleur critère de visibilité routière. A partir des différentes expérimentations (sections 4.3.1 et 4.3.2), nous proposons d’abandonner le concept de *field factor* pour s’intéresser à l’effet des différents facteurs. Ainsi, en fonction de la tâche de conduite, tel ou tel facteur (excentricité, tâche de conduite, dynamique, etc.) aura un poids plus ou moins important. Nous suggérons en conséquence de s’appuyer sur une classification de l’usage de la voirie (comme on peut en trouver, par exemple, dans les recommandations de l’AFE) pour définir les exigences en termes d’éclairage public, en modulant des *field sub-factors* en fonction de cette classification. Des discussions doivent bien entendu être engagées avec les professionnels de l’éclairage public afin de voir si cette nouvelle approche peut contribuer à renouveler les recommandations et les pratiques des professionnels pour la conception de l’éclairage public. Le CERTU et le CNFE pourraient alors utilement

contribuer au transfert de connaissances.

4.4 Bilan et perspectives

Le principal point commun de ces recherches, qui vont de la photométrie à l'analyse d'images en passant par l'ergonomie et l'éclairage public, est d'aborder plusieurs aspects de la visibilité routière au travers d'un modèle central en éclairage public, celui de la visibilité de cible. Il s'agit d'un modèle psychophysique qui permet de quantifier les performances visuelles des usagers de la route dans une tâche visuelle particulière, la détection. L'autre aspect que l'on peut souligner, c'est la production pour les expérimentations en laboratoire d'images contrôlées sur le plan photométrique, afin de créer des stimuli visuels adéquats.

Partant du modèle d'Adrian, nous avons montré un certain nombre de ses limites pour le dimensionnement de l'éclairage public, en utilisant de stimuli visuels dans différentes expérimentations, à l'aide notamment d'images de synthèse (section 4.3.1) et d'images routières (section 4.3.2), en contrôlant les caractéristiques photométriques de ces stimuli. Mais nous avons également cherché à appliquer ce modèle dans des domaines nouveaux, comme le diagnostic de visibilité routière sur itinéraire, qui intéresse à la fois les gestionnaires publics et les équipementiers automobiles (section 4.2.1). Nous avons également proposé une interprétation photométrique des images qui permet d'évaluer, à partir du modèle d'Adrian, la visibilité des contours dans des images (section 4.1.2).

En termes de publications, les principales contributions sont les articles de *Human Factors*, *Applied Ergonomics* et *TR-F* [MBB08a, MBB10b, MBB10a], et les articles présentés à la CIE [Bré07c, BCDG07].

Les perspectives concernent les trois approches. Concernant le calcul de visibilité dans les images (et notamment les images routières), nous n'avons à ce jour que commencé à explorer les possibilités algorithmiques ; par exemple, la notion de contour visible pourrait plus légitimement s'appuyer sur un modèle psychophysique de détection de lignes orientées, de préférence à des cibles rondes ou carrées, puisqu'on sait que le système visuel a développé des neurones spécialisés dans la détection de telles primitives. Mais surtout, les méthodes d'évaluation de la visibilité dans des images (Cf. par exemple section 6.3) peuvent nous fournir des méthodes psychophysiques permettant de comparer les algorithmes à l'état de l'art, à partir des performances d'observateurs auxquels on propose une tâche visuelle face à ces images. On peut d'ailleurs penser que notre approche est plus générale que l'application aux images routières, et que le calcul de la visibilité dans des images peut être intéressant dans d'autres applications en traitement d'images. La confrontation des approches par *CSF* et *DoG* mérite d'être approfondie.

Concernant le diagnostic routier, il nous semble que le point fort de l'approche proposée est son aspect opérationnel pour les gestionnaires et les équipementiers, puisque la méthode est applicable à partir de matériel existant (véhicule Ecodyn). Actuellement, le principal point faible concerne la difficulté à valider le modèle, qui est un problème général des modèles de visibilité routière : définir une référence à laquelle comparer les modèles. A cela s'ajoute une difficulté à faire émerger un besoin du côté des gestionnaires, et l'application embarquée nous semble aujourd'hui plus prometteuse. Concernant la validité du modèle, condition nécessaire de son utilisation, plusieurs pistes sont à l'étude avec E. Dumont : passer d'un modèle déterministe, où la cible virtuelle possède une réflectance arbitraire, à un modèle probabiliste, basé sur une distribution la plus réaliste possible des coefficients de réflexion des objets rencontrés sur la chaussée (par exemple à partir de recueils de données photométriques par le système de vidéo-photométrie Cyclope, développé au LRPC d'Angers [BGF08]). D'autre part, il semblerait intéressant de prendre en compte l'éblouissement par les véhicules venant en sens inverse, selon une démarche proche de celle utilisée par l'Université de Berkeley [DBH08], ce qui impliquerait sans doute de définir des scénarios de trafic conventionnels.

Concernant l'approche ergonomique de la visibilité routière, les perspectives opérationnelles concernent, à partir des résultats scientifiques obtenus, le transfert des résultats vers les praticiens, à travers des institutions comme le CERTU, la CIE ou l'AFE-CNFE. La question centrale que nous posons est celle du choix des critères de qualité dans la conception de l'éclairage public, et nos propositions vont dans le sens d'une modulation de l'éclairage en fonction de l'usage des voies. Toutefois notre approche n'est pas opérationnelle à ce stade, et il serait d'ailleurs présomptueux de vouloir définir des recommandations sans avoir eu auparavant une discussion approfondie avec les professionnels. A ce stade, nous avons été sollicités par la revue Lux, revue technique de l'Association Française de l'Eclairage, pour rédiger un cahier technique faisant une synthèse des travaux de thèse d'A. Mayeur [MB10].

Du point de vue expérimental il serait intéressant, pour faire le lien entre les expérimentations de laboratoire et l'expérimentation menée sur piste, de réaliser des expérimentations sur simulateur de conduite pour évaluer l'effet de variables qui sont difficiles à tester autrement, comme le trafic routier et l'*alertness* [RH37]. Une telle expérimentation est envisagée pour 2010 avec A. Mayeur, V. Bodard et F. Vienne.

Plus largement, les perspectives de l'approche ergonomique pour la visibilité routière dépassent les travaux sur la visibilité nocturne. Les résultats obtenus jusqu'ici nous incitent à poursuivre dans cette voie pour d'autres aspects de la conduite, notamment la conduite en ville, y compris de jour, à travers les notions de tâche de conduite et de charge mentale.

Chapitre 5

Prise d'information visuelle dans les déplacements

La détection au sens strict (Cf. chapitre 4) est une notion incomplète si on cherche à comprendre ce qui fait qu'un objet est vu par l'automobiliste : elle se réfère à des situations dans lesquelles l'attention est relativement disponible, et les distracteurs absents. On peut voir des objets ou des événements que l'on ne regarde pas explicitement, par exemple un objet particulièrement saillant qui attire notre attention en vision périphérique [Knu07]. Réciproquement, on peut regarder un objet sans le voir (c'est le cas, spectaculaire, des expériences sur la cécité attentionnelle [SC99]).

Comme on l'a vu, la vision joue un rôle primordial [Siv96], permettant d'acquérir des informations à distance et ainsi de mieux anticiper. La prise d'information conditionne toute la chaîne de traitement de l'information visuelle jusqu'à la décision finale. A travers les biais dits *top-down* (descendants), elle est liée aux notions d'anticipation, de représentation, d'attente, de recherche visuelle, de compréhension et de signification de ce qui est perçu.

Une meilleure description de la prise d'information visuelle en conduite permettrait donc de mieux adapter l'aménagement routier et urbain à ce que voient réellement des usagers [LL94, MD07, Pot00]. Les recherches sur la lisibilité de la route renvoient par exemple à la question de savoir comment l'usager perçoit et interprète son environnement (infrastructure, autres usagers) pour interagir avec lui.

Par rapport à la démarche présentée Fig. 3.2, nous abordons ici la vision routière à travers l'idée de « regarder » (Fig. 5.1), ce qui se réfère à la fois à la théorie de l'attention et aux aspects sémantiques présents dans les stimuli visuels, puisqu'on se demande ce qui attire l'attention lors d'une activité de déplacement.

Dans nos travaux, nous n'avons abordé qu'un aspect limité de la prise d'information en situation de déplacement. Nous avons privilégié jusqu'ici

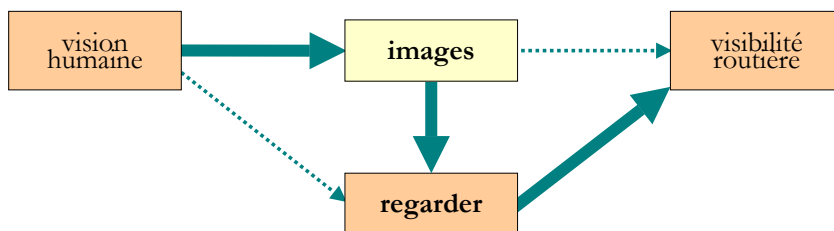


FIG. 5.1 – Prise d’information en conduite automobile : de la vision à la sécurité routière, en passant par les images.

la notion de saillance visuelle des objets routiers. Notre support principal est l’image, que ce soit à travers la psychologie expérimentale (les images comme *stimuli* visuels) ou à travers l’analyse d’image (modélisation de la saillance dans les images).

Nous avons abordé la prise d’information visuelle sous plusieurs angles complémentaires : en conduite automobile et pour des piétons, en situation réelle de déplacement, pour la réalité virtuelle, et pour la simulation de trafic (Cf. aussi [Bré03c]). L’intérêt de ces recherches se situe à différents niveaux : le principal est la production de connaissances sur la prise d’information dans les déplacements (avec M. Deugnier et L. Simon, Cf. section 5.1), mais nous nous sommes également intéressés à modéliser la prise d’information par des agents simulés, en vue d’améliorer la qualité des simulations microscopiques de déplacements urbains, qui contribue à la ville numérique (avec J.-M. Auberlet, Cf. section 5.3). Enfin nous nous sommes intéressés à la prise d’information visuelle sur simulateur de conduite, comme à un indice de la validité écologique de la simulation (avec I. Giannopulu, Cf. section 5.2).

5.1 Saillance visuelle

Nous nous sommes intéressés à un aspect de la prise d’information qui est à cheval entre perception et cognition : la saillance visuelle relève de la théorie de l’attention [IRT05, Knu07]. Avec M. Deugnier, nous nous sommes d’abord demandé quel type d’objet routier est saillant en fonction du statut de l’observateur (piéton, conducteur ou passager). Avec L. Simon et J.-P. Tarel, nous avons cherché à calculer, par traitement d’images, un indicateur fiable de la saillance visuelle des panneaux de signalisation routière.

5.1.1 Contribution : Saillance visuelle des objets routiers

Dans [BD06], nous avons cherché à mesurer la saillance visuelle de différentes classes d'objets routiers, dans une expérimentation de laboratoire. Des images routières étaient présentées à des observateurs pendant des durées variables mais courtes (moins d'une seconde), avec la consigne de citer, après coup, les principaux éléments de la scène. On assignait fictivement aux observateurs un statut : *piéton*, *conducteur* ou *passager*. Notre protocole était basé sur le rappel, ce qui est complémentaire de l'oculométrie, et plus pertinent pour accéder aux représentations mentales (objectif également facilité par des présentations d'images sur des temps courts).

L'analyse statistique des données verbales a montré que la signalisation verticale était la seule catégorie d'objets routiers à être d'autant mieux rappelée que le temps de présentation est plus long, ce qui peut s'interpréter en termes de saillance attentionnelle, ou de recherche visuelle. Nos résultats étaient cependant limités à un seul type d'environnement urbain, et à notre sens les principaux résultats sont méthodologiques. Nous avons mesuré, avec un protocole expérimental *low cost*, la saillance dans des aspects à la fois *bottom-up* (ascendante) et *top-down* (descendante). En effet, la sémantique des objets et la tâche simulée ont manifestement un impact sur l'information sélectionnée (ou au moins sur l'information rappelée), puisque nous avons observé des différences significatives dans les informations rappelées selon le statut (*Conducteur*, *Passager* ou *Piéton*).

5.1.2 Contribution : Calcul de la saillance par traitement d'image

Ce type de protocole est également intéressant pour évaluer la pertinence d'algorithmes de calcul de la saillance visuelle. Le plus connu est celui de L. Itti *et al.* [IKN98], basé sur une modélisation de mécanismes physiologiques du traitement de l'information dans les voies visuelles (traitements ascendants). Toutefois, ce type de modèles (Cf. [IK01, IRT05] pour une revue de question exhaustive) ne permet pas de modéliser correctement les facteurs descendants, et échoue à prédire l'orientation du regard dans des situations trop éloignées de la vision dite « libre ». Dans une tâche de conduite, par exemple, des facteurs comme les connaissances *a priori* modifient complètement la sélection des objets saillants (pertinents pour la conduite). La Fig. 5.2 illustre par exemple que certaines zones considérées comme saillantes au sens de [IKN98] ne le sont pas au sens de la tâche de conduite.

C'est ce que nous avons montré avec J.-P. Tarel dans une recherche exploratoire visant à définir un algorithme de calcul de la saillance visuelle des objets routiers [BTCD06]. Deux expérimentations psycho-visuelles ont été réalisées en laboratoire sur la saillance des feux tricolores. Nous avons pu montrer que la saillance *bottom-up* au sens de [IKN98] était trop réduite

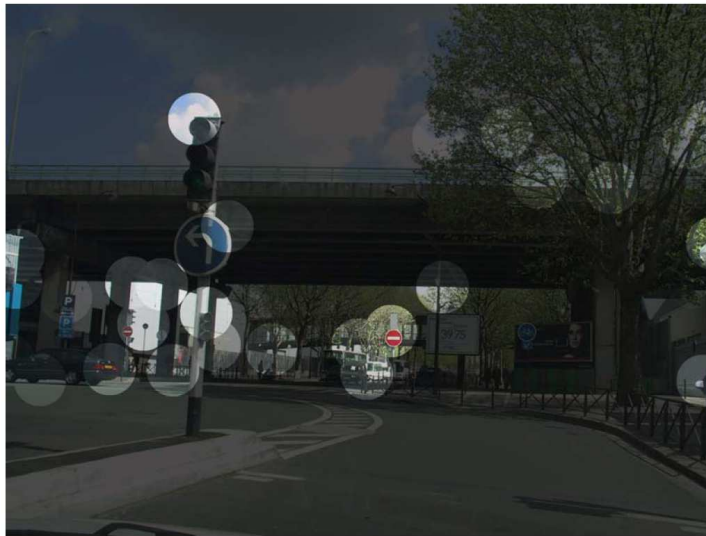


FIG. 5.2 – Calcul de saillance ascendante sur une image routière [Itti et al. 1998]. Les zones d'intérêt sont bien sélectionnées, mais aussi de nombreuses zones non pertinentes pour la tâche de conduite.

trice par rapport à la situation de conduite, même pour une signalisation de police.

Comment expliquer ce résultat ? Tout d'abord, la perception de l'environnement de la route par un conducteur est fortement liée à ses connaissances et à ses attentes. Ceci peut expliquer les différences constatées entre les stratégies visuelles des conducteurs expérimentés et non expérimentés dans deux expérimentations précédentes [TC06, BD06]. Les connaissances doivent être intégrées dans un modèle de calcul pour espérer modéliser la saillance visuelle effective pour les conducteurs. Surtout, la notion de saillance mise en jeu dans ces expérimentations est la saillance attentionnelle, sous contrainte d'une tâche spécifique (la conduite automobile). Elle comporte à la fois des aspects ascendants et descendants.

Il nous a semblé intéressant d'approcher le problème selon un autre angle qui consiste à définir la saillance d'un objet comme une évaluation de la facilité à détecter cet objet dans une image (saillance de recherche). Cette idée nous a conduit, avec J.-P. Tarel et L. Simon, à développer un détecteur d'objets routiers permettant une évaluation de la qualité de la détection. La thèse de L. Simon a en effet abordé le calcul automatique de la saillance visuelle de panneaux de signalisation par analyse d'image, en partant du constat que les modèles ascendants sont inadaptés pour prédire la saillance visuelle des objets routiers. L'approche proposée était basée sur un algorithme d'apprentissage à partir d'une base de données d'images de

panneaux et de non-panneaux, ce qui fait intervenir des notions *top-down* liées aux connaissances *a priori* sur l'objet recherché (Cf. aussi la notion de saillance discriminante introduite par Gao et Vasconcelos [GV05]).

En utilisant la technique classique des *SVM*¹ [Vap95], il est possible à partir d'une base de données d'exemples positifs (panneaux) et négatifs (non-panneaux) de construire un classifieur. Ce classifieur est ensuite utilisé pour décider si une région quelconque d'une nouvelle image est, ou non, un panneau. L'originalité de l'approche proposée, due à J.-P. Tarel, était d'interpréter le résultat du *SVM*, qui est statistiquement une estimation de la confiance dans la réponse, comme un indicateur de la saillance du panneau [STB08]. Le raisonnement sous-jacent est que plus le détecteur a confiance dans la détection, plus cette détection est facile, et donc, plus le panneau est saillant (au moins pour le *SVM*).

La validation de cette approche passait par une comparaison entre la saillance au sens du *SVM* et la saillance visuelle pour des observateurs. L. Simon a réalisé une expérimentation psycho-visuelle, basée sur l'idée que la saillance qui est estimée par le *SVM* correspond à une tâche de recherche de panneau, plutôt qu'à une tâche de conduite automobile. Les résultats obtenus sont très encourageants [STPB09a, STPB09b], puisqu'un modèle quantitatif a pu être proposé pour relier la saillance visuelle pour des observateurs humains et la saillance calculée sur les images.

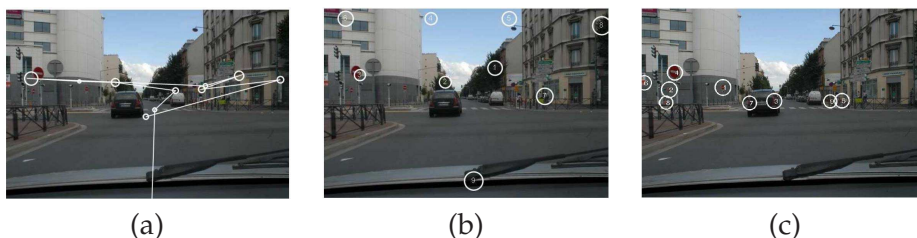


FIG. 5.3 – Comparaison entre (a) les fixations d'un sujet recherchant des panneaux de « sens interdit » ; les zones saillantes (b) d'après [IKN98] et (c) d'après le *SVM* proposé.

Plusieurs applications de cette méthode de calcul ont été proposées, à la fois pour l'aide à la décision des gestionnaires routiers [STB07, STB10a, STB10b] et pour les aides à la conduite [STB09].

5.2 Prise d'information visuelle en réalité virtuelle

Les simulateurs de conduite sont devenus un moyen incontournable pour améliorer les connaissances sur la conduite automobile. Les investiga-

¹*SVM* : Support Vector Machine.

tions qu'ils permettent de mener concernent le comportement du conducteur, la conception des véhicules et celle des infrastructures routières. Les avantages liés aux simulateurs sont nombreux : absence de risque, reproductibilité des situations, contrôle des paramètres expérimentaux, gain de temps, diminution des coûts d'expérimentation. Le développement de ces outils est largement illustré par les congrès internationaux *Driving Simulation Conference* (DSC Europe, DSC Japan) et *Road Safety and Simulation* (RSS).

La validité des simulateurs est une question cruciale et constitue une problématique scientifique en elle-même. Les connaissances validées scientifiquement sur le lien entre perception et comportement concernent essentiellement des situations « de laboratoire », mettant le sujet dans une situation qui n'a qu'un lointain rapport avec la tâche de conduite. Si la complexité des situations de déplacement en ville, du point de vue de la perception, peut sembler décourageante pour l'expérimentateur, cette complexité n'en constitue pas moins un aspect primordial, qui fait que la réduction cartésienne [Des37] manque l'essentiel : les interactions complexes entre les nombreux facteurs qui entrent en jeu. L'évaluation des biais liés aux simulateurs fait donc partie des questions que l'on doit se poser préalablement à leur usage [KP03], si l'on veut extrapoler le comportement sur simulateur à la conduite sur route [Hoc01].

Sur ces questions, nous présentons au chapitre 6 une nouvelle approche pour évaluer la qualité des images projetées dans un simulateur de conduite du point de vue de l'attention visuelle [PBT09a] (section 6.2.3), et pour produire des images de synthèse de routes nocturnes plus réalistes [BG02, PBV09] (section 6.1.2).

Par ailleurs, nous avons contribué en 2007 à la création d'un GIS impliquant notamment l'INRETS et le LCPC autour de *la Simulation pour les Recherches sur la Sécurité Routière* (SRSR), avec en particulier un programme pluriannuel sur « la simulation pour les recherches sur la lisibilité de la route ». Cette création a été l'occasion de présenter dans un ERLPC l'état des recherches dans ce domaine à partir d'articles publiés par les chercheurs des deux organismes [BEC07].

5.2.1 Contribution : Comparaison entre vidéo et réalité virtuelle

L'évaluation des simulateurs de conduite peut notamment se faire en comparant les comportements oculaires des conducteurs entre une projection vidéo et la projection de la même scène routière en images de synthèse, ce qui a été étudié avec I. Giannopulu et R. Bertin [GBB⁺07, GBB⁺08].

Les conducteurs regardent, dans la scène routière, les régions pertinentes pour la tâche de conduite, notamment pour anticiper leur trajectoire [LL94]. Le concept le plus utilisé pour rendre compte de cet aspect de la prise d'information est le flux optique. L'originalité de notre étude a été de nous intéresser à l'impact de la qualité visuelle des images sur les *patterns*



FIG. 5.4 – Exemple d’image extraite de la base de données *Rivoli*.

oculomoteurs. Pour cela, nous avons comparés les fixations et les saccades entre deux situations proches de la conduite simulée : une projection vidéo, et une simulation du même trajet en réalité virtuelle. Une maquette virtuelle de bonne qualité a été réalisée (quartier *Rivoli*, à Paris, Fig. 5.4). La vidéo, filmée à partir de trois caméras HD fixées sur le toit d’un véhicule et projetées sur les trois écrans du simulateur de conduite de l’INRETS à Arcueil, permettait d’avoir une référence de bonne qualité visuelle. La scène virtuelle a été réalisée à partir de photographies prises sur le même site et plaquées dans un monde virtuel 3D représentant le même quartier de Paris.

L’usage de vidéos sur simulateur de conduite ne permet pas aux sujets de conduire réellement le véhicule. Il leur était demandé d’utiliser le volant avec la consigne de faire « comme si » ils conduisaient. Cette méthodologie avait été utilisée dans la littérature avec des vidéos routières [MF07] (nous l’avons nous-même en partie reprise dans [MBB10b]).

Les résultats de l’étude, portant sur 26 sujets, ont montré des différences entre les deux conditions. Les variables dépendantes étudiées étaient extraites des données oculométriques : durée et nombre de fixations, latence et amplitude des saccades. Les principaux résultats sont que la durée des fixations est plus importante en environnement virtuel par rapport à la vidéo (le nombre total de fixations est également plus élevé, ce qui s’explique par les mouvements de poursuite, plus importants avec la vidéo). On ob-

serve également que la latence de la première saccade est plus longue avec la vidéo, et que l'amplitude des saccades est plus grande avec la vidéo. Par ailleurs, le sentiment d'immersion comme la qualité du rappel étaient meilleurs avec la vidéo qu'avec l'environnement virtuel [GBB⁺08]. Certains aspects de cette comparaison restent à étudier, comme la nature des objets fixés selon la condition, 3D ou vidéo.

5.3 Prise d'information visuelle par des « agents » simulés

Comme on l'a vu, la validité écologique des simulateurs de conduite est typiquement une question d'ergonomie. Mais on peut aussi l'aborder d'un point de vue technique, à partir d'une critique des modèles de simulation. C'est ce que nous avons fait, à la fois avec les images de synthèse (Cf. chapitre 6) et avec les modèles de simulation du trafic, qui peuvent être utilisés pour étudier l'impact d'aménagement routiers et urbains. S. Espié a proposé d'utiliser également ces modèles pour améliorer les simulateurs de conduite [Esp95] : dans l'architecture multi-agent proposée, le véhicule du simulateur qui est conduit par le sujet est pris en compte dans la simulation de trafic comme un agent parmi d'autres.

Les modèles multi-agents de simulation de trafic s'inscrivent dans une branche de l'intelligence artificielle qui traite de l'intelligence distribuée [Fer95]. Ils sont bien adaptés à la simulation de situations sociales, moyennant une capacité à modéliser les règles de perception, de décision et d'action des agents. Concernant le comportement des conducteurs, cela implique la prise en compte des travaux de chercheurs en psychologie de la conduite [Saa96]. A partir de règles individuelles de comportement au niveau des agents peut ainsi émerger, au niveau de la simulation, un comportement collectif (le trafic automobile) qui résulte des interactions microscopiques.

Avec J.-M. Auberlet, nous avons commencé à travailler sur la fonction de perception dans les modèles de simulation microscopique de trafic, à travers la modélisation de la prise d'information par les usagers. Ces travaux concernent à la fois les piétons (section 5.3.1) et les automobilistes (section 5.3.2). Dans le cadre du projet SICAP, financé par la FSR, nous avons également mis en place, avec R. Rabier, un dispositif innovant d'acquisition et de projection d'images routières panoramiques dans une salle de réalité virtuelle au LEPSiS [RBA09].

5.3.1 Contribution : Modèle informatique de piéton

Lors d'un post-doc à l'INRETS avec J.-M. Auberlet, A. Tom a réalisé une bibliographie sur la modélisation des piétons dans les modèles de simula-

tion microscopique (modèles de trafic, simulation de foule [TRM07], etc.). Différents aspects des déplacements piétons ont également été abordés, comme l'accidentologie et la typologie des accidents de piétons [BNR03].

Nous avons contribué à ce travail, notamment en cherchant les cadres théoriques pertinents pour l'étude des déplacements piétons, y compris dans les modèles de conduite automobile [GC38, ALA71, Neb74, Ran94, Shi07]. Nous avons constaté que la perception *par* les piétons était encore moins étudiée que la perception *des* piétons. Ce travail bibliographique a d'abord été présenté dans des séminaires [TAB07a, TAB07b], en insistant sur les modèles de trafic microscopiques qui simulent les déplacements piétons, ce qui nous a permis de cerner les limites des principaux modèles (Cf. aussi [IN08, PYG09]). Nous avons ensuite proposé dans la revue RTS les principes d'un modèle informatique de simulation de piéton, à partir de modèles psychologiques choisis pour leur pertinence par rapport aux compétences mobilisées par les piétons lors de la traversée de rue [TAB08]. Les étapes proposées par Firth [Fir82], notamment les sous-stades d'exploration visuelle (sélection d'informations pertinentes, jugement de la situation et décision de traverser), ainsi que le modèle de Endsley [End95] de la conscience de situation nous fournissent un cadre propice à l'implémentation d'un modèle informatique du piéton, par leur structure séquentielle en niveaux comme par leur capacité à rendre compte des principales compétences perceptives et cognitives qui entrent en jeu dans la décision de traverser.

Ces travaux se poursuivent avec une expérimentation dont les résultats sont en cours de dépouillement, avec A. Tom et L. Désiré, dans le cadre du Projet SICAP. Il s'agit, à partir d'un dispositif de projection vidéo panoramique [RBA09], d'obtenir une meilleure compréhension des indices visuels utilisés par les piétons dans la décision de traverser. Ces connaissances doivent contribuer à améliorer la fonction de perception et l'algorithme de décision des piétons simulés dans un modèle SMA² de trafic urbain microscopique [ABD⁺10]. L'implémentation d'un tel modèle, qui devra ensuite être partagé avec U. Ketenci (Cf. section 5.3.2) est en cours d'implémentation par L. Bourgois, avec J.-M. Auberlet, toujours dans le cadre du Projet SICAP.

5.3.2 Contribution : Fonction de perception

Nous nous sommes également intéressés, avec J.-M. Auberlet, à la fonction de perception implémentée dans les modèles de trafic microscopiques, et nous avons montré leur importance au niveau des comportements émergents [AB08]. Pour celà, nous avons considéré le cas particulier de la simulation de trafic routier, et nous avons discuté l'aspect normatif de la fonction

²SMA : Système Multi-Agent.

de perception.

Les comportements collectifs qui émergent à partir d'une modélisation fondée sur les normes présentent des limites. C'est notamment le cas lorsque ces modèles visent à reproduire des comportements humains qui, de fait, s'affranchissent parfois de ces normes (e.g. le respect strict du code de la route). Mandiau et al. [MDP⁺07] ont montré comment la possibilité pour un agent de ne pas respecter le code de la route, norme sociale, conduisait à un comportement collectif plus réaliste. Nous avons étendu cette approche à la représentation de l'environnement que se fait un automobiliste. Dans le cadre d'une simulation de trafic routier, nous avons montré l'importance d'intégrer l'anticipation du comportement d'autrui par rapport à la norme sociale, qui est complémentaire du fait de régler son propre comportement sur cette norme sociale. Pour une même fonction de décision, nous avons comparé les comportements collectifs (le trafic émergent) pour deux fonctions de perceptions différentes, l'une basée sur une anticipation du respect de la norme sociale, l'autre pas.

Les résultats obtenus montrent que la manière dont les agents perçoivent et interprètent leur environnement influence significativement les comportements observables (individuels et collectifs). Les choix effectués dans la modélisation des agents concernant la manière de percevoir l'environnement ont une influence aussi importante que ceux concernant la prise de décision, particulièrement dans le cas de modèles visant à reproduire des comportements humains.

Ce travail a été mené parallèlement à l'encadrement de la thèse de C. Floch sur la modélisation du comportement d'un conducteur en carrefour, à partir du modèle de Endsley [End95, FABB08]³. Suite à l'interruption de cette thèse en 2008, U. Ketenci a commencé une thèse sur le même sujet en octobre 2009⁴. En utilisant un modèle multi-agent de poursuite en section courante [KTH09] et un modèle multi-agent de traversée de carrefour [MCA⁺08], des résultats préliminaires ont montré que des variables liées à l'attention, comme l'anticipation et la charge cognitive, peuvent être implémentés dans ces modèles avec un effet mesurable sur le trafic émergent (débit, taux d'accident) [KABS10]. Une piste ouverte par ces premiers travaux concerne la quantification d'un « coût cognitif » associé aux fonctions de perception et de décision.

³Thèse dirigée par P. Brézillon à l'Université Paris VI, co-dirigée par J.-M. Auberlet et nous-même au LEPSiS.

⁴Thèse dirigée par E. Griselin à l'Université de Valenciennes, co-dirigée par J.-M. Auberlet et nous-même au LEPSiS.

5.4 Bilan et perspectives

Les problématiques liées à la prise d'information visuelle dans les déplacements constituent des sujets relativement récents dans nos travaux. Elles sont justifiées par le besoin, pour décrire la visibilité routière, de comprendre également ces aspects plus « volontaires » de la perception. L'analyse de la littérature conduit au constat d'une certaine pauvreté des connaissances dans ces domaines, pauvreté sans doute liée à la difficulté de transférer les connaissances d'un domaine à l'autre, en l'occurrence du laboratoire à la tâche de conduite.

En termes de publications, les principales contributions sont les articles de *Advances in Transportation Studies* [GBB⁺08] et *RTS* [TAB08], l'*abstract* dans *Perception* [STPB09b] et les papiers présentés à *Vision in Vehicles* [BD06] et IEEE IV [STB09]. On remarquera que dans la plupart de ces publications, nous apparaissions en troisième auteur. En effet, ce sont des sujets sur lesquels nous avons apporté une expertise, ou pour lesquels nous avons contribué à définir la problématique, sans être l'acteur principal de la recherche.

Concernant le calcul de la saillance visuelle, le point fort de ces travaux a été, nous semble-t-il, la démonstration par L. Simon qu'un modèle de calcul de la saillance visuelle pertinent pour la conduite était possible, en utilisant une démarche d'apprentissage par SVM. Toutefois, on se heurte ici à la pauvreté des données de référence, en l'occurrence des données oculométriques en situation de conduite. Le développement au LRPC de St Brieuc en 2009 d'un véhicule instrumenté dédié à l'observation du conducteur devrait contribuer à résoudre ce problème dans les années à venir. Dans le même sens, nous avons mis en place en 2009 un groupe de travail sur l'oculométrie routière entre le LEPSiS et les LRPC d'Angers et de St Brieuc.

Le travail de I. Giannopulu sur la validité écologique d'un simulateur de conduite, à partir de données oculométriques, constitue à notre sens un travail original, notamment par sa démarche méthodologique consistant à comparer réalité virtuelle et vidéo. Cet travail aurait dû se poursuivre en 2009 par une thèse au LEPSiS encadrée par S. Caro (l'étudiant retenu s'est malheureusement désisté en octobre 2009). Dans le cadre du Projet SICAP, une approche voisine a été mise en oeuvre pour utiliser un dispositif de réalité virtuelle du LEPSiS (6 écrans HD verticaux) pour la projection de vidéos panoramiques (sur plus de 160°) à des sujets en situation de traversée de rue. Ce projet constitue la continuité des travaux initiés avec A. Tom et J.-M. Auberlet qui sont partis d'une critique des modèles de simulation piéton, pour déboucher sur une expérimentation qui doit alimenter un nouveau modèle de simulation en ce qui concerne la « fonction de perception » dans un SMA. Enfin la thèse de U. Ketenci doit permettre de mieux comprendre l'impact des facteurs perceptifs de prise d'information sur le

comportement des automobilistes, dans des situations simples de carrefour urbain. Les deux modèles, piéton et automobiliste, ont bien entendu vocation à se compléter dans une plate-forme de simulation commune.

Chapitre 6

Des images « réalistes » pour les recherches routières

J. Ferwerda a proposé de distinguer trois niveaux pour décrire le « réalisme » des images [Fer03] :

- le réalisme physique : l'image provoque le même stimulus visuel que la scène modélisée ;
- le réalisme perceptif : l'image provoque la même perception que la scène ;
- le réalisme fonctionnel : l'image donne la même information que la scène.

Ces niveaux sont emboîtés, au sens où chacun d'eux implique le suivant. Dans nos recherches sur la production d'images de synthèse pour des applications routières, nous visons essentiellement le réalisme perceptif. Toutefois le réalisme physique (ou photométrique) est un moyen légitime d'arriver à ce résultat : en simulant la propagation de la lumière selon les lois de l'optique et de la photométrie, on peut se rapprocher du réalisme physique, qui implique le réalisme perceptif.

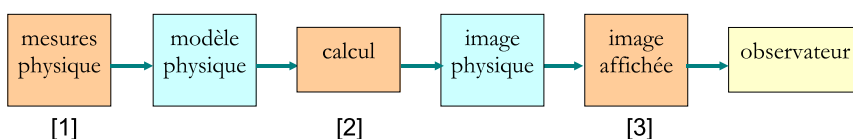


FIG. 6.1 – Les étapes du calcul et de la visualisation des images de synthèse « réalistes » au sens physique. 1 : Mesures photométriques. 2 : Calcul de propagation de la lumière. 3 : Visualisation.

Le réalisme physique concerne chacun des niveaux classiques du calcul des images de synthèse par simulation de la propagation de la lumière (Fig. 6.1) :

1. Les données d'entrée des modèles : il s'agit d'alimenter les modèles de calcul avec les propriétés photométriques et optiques des éléments de la scène (propriétés de réflexion des surfaces, d'émission des sources, etc.).
2. Les modèles de calcul de la propagation de la lumière (réflexions, inter-réflexions, échantillonnage spectral, masquage, ombrage, etc.).
3. La visualisation sur écran des images calculées en unités photométriques : contrôle du rendu visuel par rapport à l'image calculée.

La création récente du LEPSiS, UMR¹ entre l'INRETS et le LCPC, doit permettre une maîtrise de l'ensemble de la chaîne, depuis les mesures photométriques jusqu'aux dispositifs de réalité virtuelle. Nous abordons, dans ce qui suit, les points 2 (section 6.1) et 3 (section 6.2).

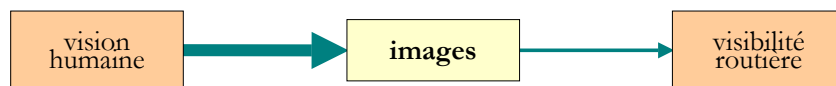


FIG. 6.2 – De la vision à la sécurité routière, en passant par les images. Mais quelles images permettent d'étudier la vision en conduite automobile ?

Par rapport à notre approche de la visibilité routière, nous dirons (Fig. 6.2) que l'on cherche ici à améliorer ou à qualifier les images (essentiellement des images de synthèse) pour des utilisations visant à mieux comprendre la visibilité routière. Ce dernier point est capital car il donne des critères de qualité, fournit des modèles de vision et permet d'orienter les choix algorithmiques.

6.1 Calculs d'illumination globale et locale

C'est dans les années 1980 que se sont développés les calculs de radiosité, qui simulent la propagation de la lumière dans une scène à partir d'un maillage par échange d'énergie (*radiosity*) [SP94]. A l'époque, le problème principal était le calcul des images à partir d'une modélisation géométrique de la scène : illumination globale avec la radiosité, illumination locale (liée à un point de vue) avec le lancer de rayons.

Le LCPC a développé son propre moteur de calcul, LISE-LCPC [BNCL91, BCNL92], dont l'originalité à l'époque était d'échantillonner le spectre visible et de faire des calculs de radiosité pour chaque longueur d'onde de la lumière [DCWP02], avant de calculer la couleur et la luminance des surfaces à l'aide des fonctions colorimétriques CIE : $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ et $\bar{z}(\lambda)$. Le laboratoire de photométrie du LCPC permettait d'alimenter les modèles avec

¹UMR : Unité Mixte de Recherche.

des mesures de propriétés spectrales des surfaces et des sources lumineuses [HCR93]. L'objectif de ces travaux était de disposer d'un outil de calcul d'éclairage en unités physiques, et d'images de synthèse dont les caractéristiques physiques (couleurs, contrastes, luminances) soient comparables aux mêmes caractéristiques sur le site simulé (Fig. 6.3). La finalité de ce logiciel était au départ l'ingénierie publique : les calculs d'éclairage permettent d'évaluer la qualité et la conformité de projets d'éclairage public et de les visualiser [BB99b]. L'application à la simulation de conduite est venue ensuite, avec l'objectif de rendre les simulateurs suffisamment réalistes pour permettre de les utiliser de nuit, sous éclairage public, pour des études de sécurité routière (section 6.1.1).

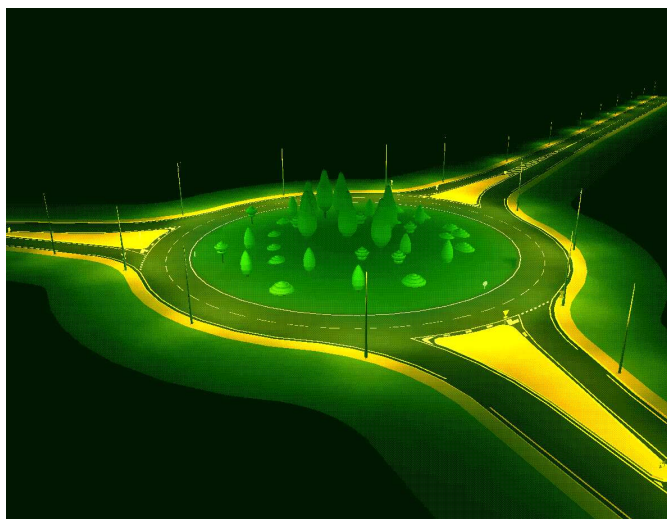


FIG. 6.3 – Rendu de l'éclairage d'un carrefour giratoire calculé par le logiciel LISE-LCPC.

Utiliser un calcul d'illumination globale dans une application en réalité virtuelle pose la question du temps réel. Certaines solutions sont exclues, comme l'utilisation de « sources » *OpenGL* limitées à 8, ce qui est incompatible avec un alignement de luminaires. Un pré-calcul de l'éclairage public par un algorithme de radiativité semblait possible, et c'est ce que nous avons implémenté avec *Oktal* [Bré03a], leader en France sur le marché de la simulation de conduite. Cette collaboration a permis d'intégrer des calculs d'éclairage physiquement réalistes dans des environnements virtuels. L'utilisation de *shaders* semble une bonne solution pour les sources mobiles comme les phares automobiles [LKK99], et nous avons réussi avec J. Petit à intégrer éclairage public et éclairage automobile en temps réel dans des scènes de réalité virtuelle sous *OpenSceneGraph* [PB10b] (Cf. section 6.1.2).

Par ailleurs, nous avons mis en évidence des problèmes de réalisme co-

lorimétrique pour le rendu des textures par les algorithmes de radiosité [Br 97]. La représentation usuelle d'une texture est une image, mais une telle représentation est invariante par rapport à l'éclairage. Une bonne représentation doit au contraire permettre de calculer le rendu visuel des surfaces éclairées par un éclairage quelconque. Le problème étant ainsi posé, nous avons proposé avec V. Boulanger une méthode de calcul d'éclairage local des surfaces texturées qui puisse se combiner avec un calcul d'éclairage global (comme l'est la radiosité), de manière à améliorer le réalisme colorimétrique du rendu final [Bou00].

6.1.1 Contribution : Simuler les échanges lumineux

A partir du logiciel de calcul d'éclairage LISE-LCPC, nous avons développé une nouvelle algorithmique basée sur une structuration hiérarchique des scènes géométriques (Cf. Fig. 6.4) et sur une factorisation des échanges d'énergie [Br 02d]. L'intérêt de la solution retenue était l'optimisation des performances de calcul pour les scènes routières et urbaines. En effet, le découpage des scènes retenu ainsi que les échanges d'énergie sont d'autant plus efficaces que la géométrie possède des caractéristiques spécifiques typiques de ces scènes : grande étendue, scènes ouvertes, faible importance des ombres. L'éclairage routier et urbain permet, du fait de l'uniformité des éclairagements sur la chaussée et de la régularité des implantations de luminaires, de choisir *a priori* les formats de données les plus efficaces.

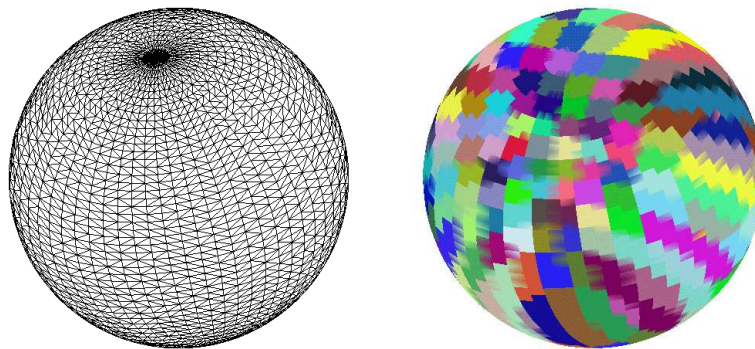


FIG. 6.4 – Regroupement hiérarchique en agrégats d'un maillage fin, en vue d'un calcul d'éclairage (radiosité hiérarchique). En couleur (  droite), les agrégats formés à partir des mailles (visualisées en filaire à gauche).

Ce logiciel a été validé, à la fois par comparaison avec des calculs analytiques dans des configurations géométriques simples, et par comparaison avec la version antérieure, validée mais moins rapide [BCNL92]. Les performances sont satisfaisantes pour des scènes routières et urbaines usuelles,

avec des écarts par rapport au calcul exhaustif des échanges lumineux de l'ordre de grandeur des erreurs de mesure dans le domaine routier (l'incertitude de mesure de luminance *in situ* est de l'ordre de 5%). Ce travail nous a conduit à proposer une métrique perceptive (en luminance) dans l'évaluation de la qualité des images, ou plus exactement, de scènes 3D, ce qui est à la fois plus original et plus délicat. Nous avons ainsi contribué au développement d'un logiciel de calcul d'éclairage en unités physiques qui permet d'évaluer des projets d'éclairage public. Il permet également de calculer des images de synthèse (rendu) ainsi que des scènes virtuelles (VRML²), avec la restriction que les surfaces sont lambertiennes (diffusion isotrope de la lumière).

Parallèlement, nous avons développé un logiciel de calcul d'éclairage public permettant de tenir compte de la luminance directionnelle de la chaussée (BRDF³) pour des alignements de luminaires [Bré02a]. Nous nous sommes appuyés sur des mesures goniométriques de surfaces de chaussées réalisées au laboratoire de photométrie du LCPC. Ce logiciel contribuait à deux objectifs : le calcul des « nuisances lumineuses » (flux réfléchi vers les façades et vers le ciel), et le calcul de cartographies de luminance de la chaussée pour un observateur au volant, plus précis qu'avec un modèle de chaussée lambertienne. Il a été utilisé avec X. Janc dans une recherche sur la pollution lumineuse [Jan01], en relation avec C. Remande (AFE). Ces travaux retrouvent une nouvelle actualité avec le Grenelle de l'Environnement (Cf. section 2.1.2).

6.1.2 Contribution : Calculs d'éclairage pour la réalité virtuelle

Une convention de recherche entre le LCPC et Oktal a permis de réaliser une chaîne de production complète de bases de données temps réel de scènes routières intégrant un calcul d'éclairage photométrique et colorimétrique [Bré03a]. L'objectif était de développer un outil de calcul permettant une visualisation interactive et réaliste de maquettes virtuelles d'aménagements routiers sous éclairage public.

Cette chaîne de calcul (appelée SEMAPHORE⁴) a permis d'envisager des expérimentations sur simulateur de conduite en situation nocturne (Cf. le projet que nous avons déposé au PREDIT en 2002 sur la « Visibilité des Piétons en Ville⁵ »), et à la société Oktal de proposer à ses clients une nouvelle fonctionnalité dans ses bases de données, à la fois pour la simulation de conduite et pour l'aménagement urbain. Elle a conduit à enrichir le format des bases de données 3D d'Oktal, de manière à pouvoir associer

²VRML : *Virtual Reality Markup Language*.

³BRDF : *Bidirectional Reflexion Distribution Function*.

⁴SEMAPHORE : Simulation d'Eclairage de Maquettes virtuelles PHOtométriquement REalistes.

⁵Projet rejeté par le PREDIT.

des données photométriques et spectrales aux matériaux et aux sources lumineuses des scènes [Mor00, Lux01, Tro02]. Ces développements ont également permis, conjointement avec Philips Eclairage, la réalisation d'une maquette virtuelle photométriquement réaliste du tunnel de Fourvières à Lyon dans le cadre du projet PREDIT « Tunnel » en collaboration avec ISIS, le CNRS et Scetauroute (Fig. 6.5).



FIG. 6.5 – Maquette virtuelle du tunnel de Fourvières éclairé : section courante (à gauche) et sortie (à droite).

Les résultats de cette convention de recherche ont été présentés à DSC [BG01] et VRIC [BG02]. A partir du projet d'éclairage et d'une base de données destinée à la simulation de conduite, nous avons défini des *light maps* et des *texture maps* qui sont ensuite visualisées en *multi texturing* à partir du maillage et des textures de la base de données originale, donc sans modifier les performances de rendu. Notre approche consistait à pré-calculer l'éclairage de la scène par un algorithme de radiosité (avec LISE-LCPC), puis à remplacer les textures originales par ces textures calculées correspondant au projet d'éclairage. La possibilité de ré-utiliser partiellement des bases de données existantes est un point important dans la crédibilité de notre approche (Cf. aussi [PBV09]). Les principales étapes du calcul étaient les suivantes :



FIG. 6.6 – Rendu d'images de synthèse (  droite)   partir d'un calcul d'éclairage (*light maps*, au milieu) mix  à des textures (  gauche).

1. Description des sources d'éclairage et des surfaces éclairées par leurs propriétés spectrales et directionnelles d'émission et de réflexion de la lumière (seules des surfaces lambertiennes ont été implémentées).
2. Modification du maillage initial, de manière à disposer d'un maillage fin pour le calcul de radiosité.
3. Calcul d'éclairage (radiosité hiérarchique). Le résultat donne, pour chaque maille du nouveau maillage, une couleur en unités physiques.
4. Transformation des couleurs calculées en couleurs RGB par un opérateur de *tone mapping* (Cf. aussi section 6.2).
5. Calcul des *light maps* (cartes de lumière) pour les mailles de la scène d'origine, par une prise de vue virtuelle dans la scène sur-maillée.
6. Normalisation des textures d'origine dans des *textures maps*, en forçant une moyenne de 0,5 sur chacun des trois canaux RGB.
7. visualisation temps réel en *multi-texturing* (Fig. 6.6).



FIG. 6.7 – Images extraites d'une vidéo produite avec le *pipeline* de rendu *HDR* proposé avec J. Petit.

Ces travaux ont été repris récemment dans un autre contexte avec J. Petit. La question soulevée était l'amélioration des bases de données utilisées classiquement pour la simulation de conduite, en passant des textures classiques *LDR*⁶ (photographies de façades, de chaussée, etc.) à un calcul d'éclairage *HDR*. Un modèle d'éclairage a été développé avec *OpenGL* (sous *OpenSceneGraph*), utilisant des *pixel shaders*, de manière à intégrer des

⁶*LDR* : *Low Dynamic Range*.

calculs d'éclairage et des textures *HDR* dans des scènes virtuelles [PBV09, PB09, PB10b]. La dynamique des images *HDR* calculées est ensuite compressée en temps réel par un opérateur de *tone mapping* [IFM05] pour être visualisée sur un écran *LDR*.

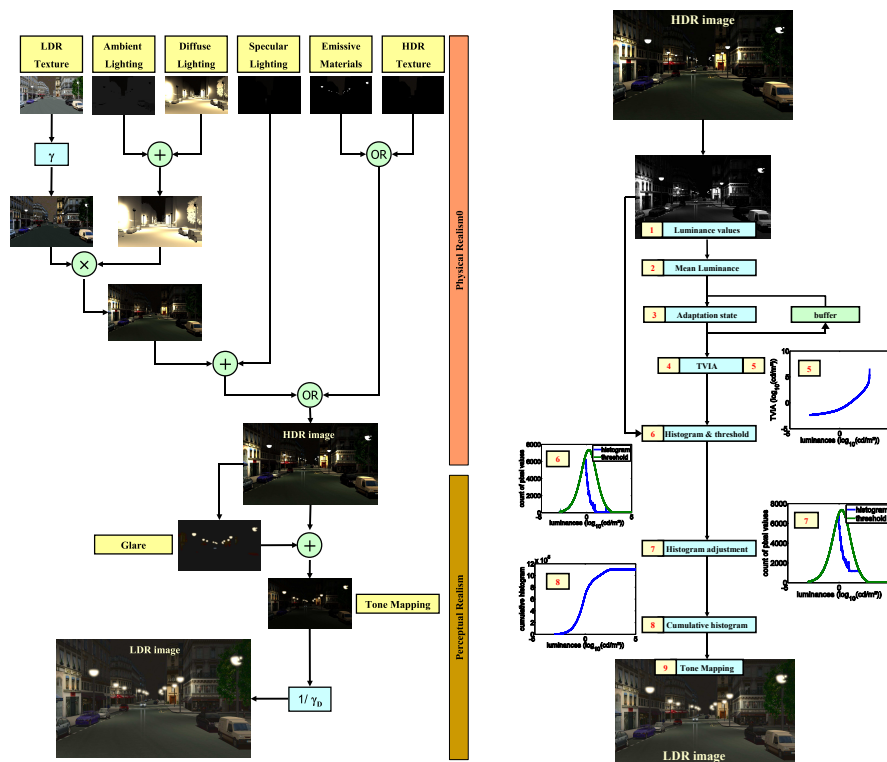


FIG. 6.8 – pipeline graphique pour le calcul de scènes *HDR* et leur affichage *LDR* en temps réel. A gauche, le pipeline de rendu. A droite, l'implémentation temps réel du *tone mapping* dans des *pixel shaders*.

Cette approche, qui reprend certains résultats de Lecocq [LKK99], résout le problème central de la simulation de conduite de nuit, à savoir la cohabitation de sources lumineuses mobiles (éclairage automobile) et statiques (éclairage public). Nos contributions portent principalement sur le fait d'avoir ré-interprété physiquement les textures *LDR*, d'une manière qui permet de réaliser un calcul d'éclairage simplifié en temps réel. Nous avons implémenté ce modèle sur un pipeline de rendu temps réel (Fig. 6.8) qui fonctionne sans optimisation poussée à 30 images par secondes avec 75 sources lumineuses dans la scène, sur un PC Intel Core2 Duo, avec une carte graphique nVidia GeForce GTX 280, pour des images HD.

La logique de ce pipeline de rendu consiste à calculer, dans un premier temps, des images *HDR* en unités physique (luminance), qui sont ensuite

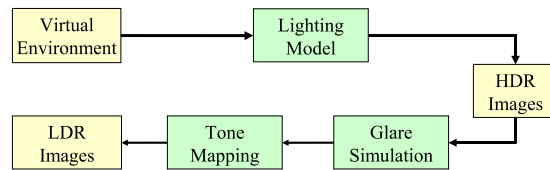


FIG. 6.9 – Principe du pipeline de rendu proposé : une simulation d’éclairage produit des images physiques HDR, qui sont ensuite affichées à l’écran après une simulation d’éblouissement et un *tone mapping*. La première étape vise un réalisme physique, la seconde un réalisme perceptif.

visualisées après *tone mapping*. Les effets du voile d’éblouissement sont également simulés (Cf. Fig. 6.9).

6.1.3 Contribution : Rendu des textures

Les algorithmes de radiosité ne permettent pas un rendu fidèle des textures, car ils calculent, pour chaque maille d’une scène, une couleur moyenne [Bré97]. Cette couleur est ensuite modulée par la texture d’origine, ce qui peut conduire à un biais par rapport à l’objectif de réalisme physique ou perceptif. Par exemple, une surface fortement polychromatique (Fig. 6.10.a) éclairée par une source d’éclairage SHP (spectre discontinu) devient pratiquement monochromatique (Fig. 6.10.b). Or si l’on module la couleur moyenne calculée par la texture de la surface (texture d’origine dans une base de données), on obtient une texture fortement polychromatique (Fig. 6.10.c).



FIG. 6.10 – Le rendu des textures par les approches classiques conduit à des erreurs colorimétriques. (a) Image originale. (b) Eclairage modifié, source lumineuse quasi-monochromatique. (c) Rendu visuel basé sur un calcul d’éclairage moyen.

Nous avons cherché, avec S. Lay, une représentation adéquate des textures pour le calcul d’éclairage, avec l’objectif d’améliorer le rendu des textures dans LISE-LCPC. Nous avons ainsi proposé de décrire la texture d’un

matériau comme un ensemble de paramètres statistiques qui décrivent l'aspect visuel du matériau indépendamment de l'éclairage, et permettent de reproduire son apparence visuelle sous un éclairage quelconque [Lay97]. Dans un deuxième temps, avec V. Boulanger, nous avons utilisé une image spectrale de coefficients de réflexion pour représenter les textures [Bou00]. L'approche proposée peut se décomposer en trois étapes [BB99a] :

1. Calcul d'une image de spectres de réflexion à partir des couleurs RGB d'une texture (méthode inspirée de Glassner [Gla89]) ;
2. Calcul d'illumination globale avec, pour chaque maille de calcul, un spectre d'éclairement moyen ;
3. Calcul d'illumination locale, pour chaque maille, à partir du spectre d'éclairement et de la texture des spectres de réflexion.

Le réalisme colorimétrique repose également sur une calibration de la luminance et de la couleur lors de l'acquisition de la texture du matériau (dans notre cas, numérisation par scanner de négatifs en photographie argentique), permettant ainsi de minimiser les erreurs sur l'estimation des couleurs du matériau. Une méthode d'évaluation des résultats a été proposée et mise en œuvre, selon les étapes suivantes :

1. Calibration photométrique du système d'acquisition des images ;
2. Photographie du matériau M éclairé par une source S_1 ;
3. Calcul de l'image de texture (un spectre de réflectance par pixel) ;
4. Simulation de la texture du matériau M éclairé par une source S_2 ;
5. Contrôle de la qualité du résultat à partir d'une photographie de M éclairé par S_2 .

A noter que nous avons abordé avec V. Boulanger la calibration des capteurs et la question des distances entre images, questions qui ont été reprises depuis dans [BTDH] (section 6.3.1).

6.2 Visualisation des images de synthèse

Les images de synthèse calculées en unités physiques (Fig. 6.11) permettent de réaliser des études de visibilité et de lisibilité routière, que ce soit avec des protocoles expérimentaux psycho-physiques ou sur simulateur de conduite [BEC07]. Le principal obstacle à l'utilisation de telles images porte actuellement sur la visualisation à l'écran, du fait des limites techniques des systèmes d'affichage. Cet obstacle est contourné, en pratique, par des algorithmes de transposition permettant de convertir un signal visuel à afficher en signal affichable. Il résulte de l'utilisation de tels algorithmes une dégradation du signal, et des stratégies sont proposées dans la littérature pour minimiser cette dégradation.

Le contrôle de la visualisation des images passe d'abord par la photométrie des écrans. La caractérisation photométrique et colorimétrique d'un écran permet de modéliser la luminance et la couleur affichée en fonction des valeurs d'adressage (triplet RGB). Il existe des modèles standard (e.g. *Gain-Offset-Gamma*) et des procédures standard de caractérisation des écrans (e.g. [CIE96]).



FIG. 6.11 – Image de synthèse calculée en unités photométriques (logiciel PROF, Cf. [Dumont 2002]), présentée en niveaux de gris.

Mais des facteurs techniques limitent les capacités d'affichage des dispositifs de visualisation, conduisant à dégrader les images calculées au moment de leur présentation visuelle. Ces dégradations peuvent conduire à une perception biaisée par rapport à la situation simulée, et donc à un biais sur les performances visuelles et (sur simulateur) sur le comportement de conduite. Les trois principales dégradations de l'image sont les suivantes :

- *Gamut mapping* : sur un écran utilisant trois primaires, certaines couleurs (au sens de la colorimétrie) ne sont pas affichables [ML01]. Ce problème présente peu d'enjeu par rapport aux problématiques de visibilité routière⁷.
- *Tone mapping* : les écrans sont limités en luminance, d'une part parce que les plus faibles luminances affichables sont trop élevées (e.g. par rapport à une chaussée la nuit), d'autre part parce que les plus fortes luminances affichables sont trop faibles (e.g. par rapport à des phares éblouissant). De nombreuses stratégies algorithmiques ont été proposées pour compenser ces limites (*Tone Mapping Operators*, ou *TMO*) [RWPD05].
- *Quantification* : Les technologies standard utilisent 8 bits par canal pour l'affichage des images (voir cependant le développement récent de technologies Haute Dynamique [SHS⁺04, Sim09a]). Pour des images en niveaux de gris, par exemple, cela implique que seules 256 valeurs de luminance distinctes peuvent être affichées, ce qui peut

⁷Sauf peut-être pour les sources lumineuses de couleur rouge, comme les feux tricolores, les feux stop, etc.

produire des artefacts gênants, puisque certains contrastes peuvent être effacés artificiellement, tandis que d'autres peuvent être exagérés par la troncature des valeurs physiques.

Les enjeux les plus importants pour la visibilité routière sont d'abord le *tone mapping*, et dans une moindre mesure la quantification. En collaboration avec F. Viénot (MNHN), puis avec les thèses de J. Grave et J. Petit, nous avons progressivement défini et utilisé des critères d'évaluation psycho-visuelle de la qualité des images, et proposé des algorithmes de *tone mapping* pour des images fixes et dynamiques.

Les concepts de *High Dynamic Range (HDR)* et de *Low Dynamic Range (LDR)* étant centraux ici, on rappelle que le *HDR* se réfère aux images à haute dynamique de luminance, ce qui est lié à la fois au rapport entre la plus forte et la plus faible luminance dans l'image, et à la quantification (8 bits par canal pour les images *LDR* affichées sur les écrans classiques, jusqu'à 32 bits pour les images *HDR*).

6.2.1 Contribution : Evaluation psycho-visuelle

Après une première exploration des *TMO* avec G. Pouliquen [Pou99], nous avons participé avec E. Dumont et le MNHN à une évaluation d'opérateurs par une méthode psychophysique. Nous avons évalué l'apparence visuelle (jugements sur des dégradés de gris, Cf. Fig. 6.12.a) et les performances visuelles (discrimination d'une ligne pointillée parmi des lignes continues, Fig. 6.12.b) pour des images après *tone mapping* par rapport à une présentation en *HDR*.

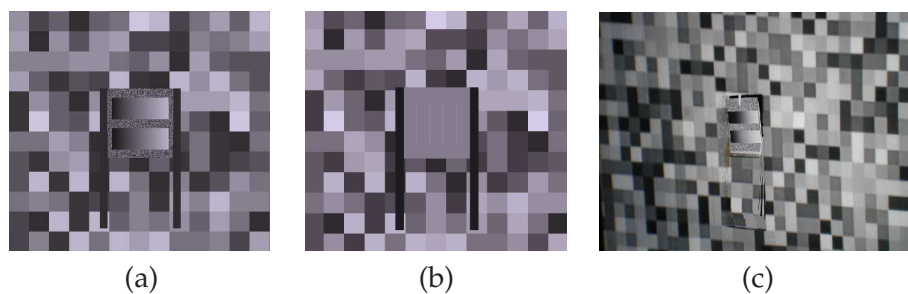


FIG. 6.12 – Images de référence pour l'évaluation de la qualité des algorithmes de *tone mapping* du point de vue (a) de l'apparence visuelle et (b) de la performance visuelle. (c) : Photographie de la scène physique utilisée lors de l'expérience au MNHN pour produire les données psycho-visuelles de référence. Au centre, des images imprimées sont montées sur un moteur rotatif.

L'originalité de ces travaux était double : d'une part, alors que l'évaluation des *TMO* utilise classiquement des critères subjectifs comme le « réa-

lisme » ou la « qualité » des images (Cf. par exemple [KYL⁺07]), nous avons également utilisé un critère de performance visuelle (discrimination), plus pertinent pour décrire la visibilité routière. L'autre originalité (trois ans avant [YBMS05]) a consisté à utiliser une scène physique HDR comme référence, et à comparer l'apparence et la performance visuelle sur des images après *tone mapping* par rapport à l'apparence et aux performances face à la scène physique. Deux algorithmes classiques [War94, WRP97] ont ainsi pu être comparés à des opérateurs linéaires naïfs.

Dans des communications à DSC et CGIV [VBdC⁺02, VBBD02], nous avons évalué l'apparence visuelle de dégradés après application d'un *TMO*. Il s'agit d'un critère subjectif classique, qui permet de décrire la fidélité de la scène visualisée à l'écran par rapport à une scène physique de référence : en l'occurrence, un mur de polystyrène éclairé de manière contrôlée (Cf. Fig. 6.12.c). Le test était présenté sur une plaque montée sur un moteur rotatif, permettant de passer d'un test au suivant. Les dégradés étaient imprimés avec différentes valeurs de γ et présentés deux par deux, et il était demandé aux observateurs de choisir à chaque fois le plus « régulier ».

Ces « scènes visuelles » ont été photométriquement mesurées afin de construire des images en luminance (*HDR*) affichées sur écran *CRT* après compression de la dynamique par un *TMO*. Cette méthode a permis d'estimer la valeur « préférée » de γ pour chaque observateur devant l'écran *CRT*. Un bon *TMO* devait permettre de conserver la valeur du γ préféré devant la scène physique, mais aucun des opérateurs testés n'a vérifié ce critère.

Dans [DBB⁺03, BD03b], un critère de performance visuelle a été ajouté, par analogie avec une tâche visuelle en conduite : discriminer entre des lignes continues et discontinues (Fig. 6.12.b). Un résultat intéressant (bien que partiel) est que les *TMO* qui conduisent à sur-évaluer le γ dans l'expérimentation subjective sont les mêmes que ceux qui détériorent la détection des contrastes.

6.2.2 Contribution : *TMO* dédié à l'étude de la visibilité

Dans un deuxième temps, un opérateur de *tone mapping* spécifique a été proposé et validé avec J. Grave dans le cadre de sa thèse pour une application particulière : la visibilité routière [Gra06].

Nous avons suivi la même démarche générale que dans [VBdC⁺02], et montré par une expérience psycho-visuelle que l'opérateur proposé avait de meilleures performances, pour une tâche de détection de cible (anneau de landolt, Cf. Fig. 6.13), que des algorithmes classiques [War94, WRP97, PFFG98, RSSF02]. Trois situations ont été étudiées : une scène de jour dans le brouillard, et deux scènes de nuit avec et sans source lumineuse dans l'image. Nous avons également réalisé une évaluation subjective de cet algorithme (jugements de préférence) qui donne, curieusement, de bonnes performances pour les images routières traitées [GB08].

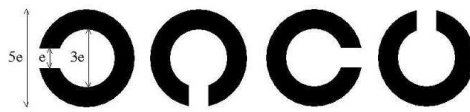


FIG. 6.13 – Anneau de Landolt, avec les 4 positions possibles pour la brisure que l’on demande aux observateurs de localiser.

Notre démarche a d’abord été présentée lors du congrès de l’AFIG⁸ [Bré02c]. Suite à la collaboration avec le MNHN, nous souhaitons définir un *TMO* respectant les performances visuelles des observateurs, notamment le niveau de visibilité des objets présents dans la scène. Nous avons donc proposé une méthode d’évaluation du système de visualisation, qui comprend à la fois un *TMO* et un dispositif d’affichage des images.

Dans [GB05a], nous avons présenté un *TMO* conçu avec cet objectif de préserver la perception visuelle des observateurs pour une tâche de détection. Nous avons repris l’idée classique que le système visuel humain fonctionne comme un ensemble de filtres passe-bande, et que la fonction de sensibilité au contraste est l’enveloppe de leurs réponses [CR68]. L’algorithme proposé utilise le modèle de visibilité (*JND*⁹) de Ward *et al.* [WRP97], lui-même repris de Ferwerda *et al.* [FPPG96]. Il utilise également une décomposition pyramidale de l’image [BA83] pour calculer l’adaptation visuelle et les contrastes aux différentes échelles spatiales [Pel90]. Chaque niveau est ensuite traité séparément, notamment pour le calcul de la luminance d’adaptation, de manière à préserver la perception des contrastes aux différentes échelles spatiales.

Pour évaluer notre algorithme, nous avons mis au point une expérience psychophysique inspirée de la précédente [VBdC⁺02], mais avec une mise en œuvre beaucoup plus simple. Nous avons pu comparer les performances visuelles des observateurs lorsqu’ils accomplissaient une tâche de détection face à une image HDR, par rapport à la même image traitée par un *TMO* et affichée sur un écran *LDR* (Cf. Fig. 6.14). La scène de référence était une image *HDR* affichée par un projecteur DLP (luminance maximale 3 fois plus importante, dynamique 2,5 fois plus importante que la configuration *LDR*). Les performances visuelles des observateurs étaient mesurées avec un anneau de Landolt : une brisure apparaissait pendant 100 ms et les sujets devaient indiquer sa position (Fig. 6.13). Les résultats ont montré que notre opérateur permettait de mieux préserver les performances visuelles, pour une scène de conduite diurne, que les opérateurs testés [War94, WRP97].

Nous avons par la suite ajouté à notre évaluation l’opérateur proposé

⁸AFIG : Association Française d’Informatique Graphique.

⁹*JND* : *Just Noticeable Difference*.

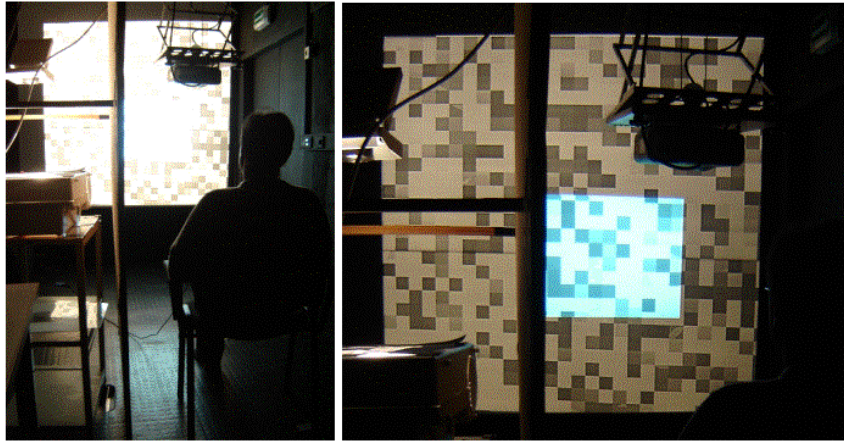


FIG. 6.14 – Expérimentation psycho-visuelle dans la salle CLOVIS du LCPC.

par Reinhard *et al.* [RSSF02] qui apparaissait dans la littérature comme un opérateur performant [LCTS05]. Dans [GB05b], nous avons utilisé une image ayant l’histogramme d’une image routière diurne, mais en supprimant les aspects sémantiques de la scène (« façon puzzle », comme disait B. Blier [Lau63], Cf. aussi Fig. 6.14). Notre algorithme donnait également de bons résultats, confirmant que des images de synthèse peuvent être utilisées dans des expériences psycho-visuelles malgré les limites des dispositifs d’affichage.

Nous avons ensuite abordé les images nocturnes, qui représentent des conditions extrêmes pour les *TMO*, et en même temps des conditions de visibilité dégradée pour lesquelles les images de synthèse peuvent contribuer utilement aux études de visibilité [GB06]. Le problème de la transposition de luminance atteint une intensité particulière avec ces images, d’une part à cause de la très forte dynamique (des régions très sombres cohabitent avec des régions très lumineuses), d’autre part du fait de la quantification des images en 8 bit peut produire des artéfacts visibles dans les régions les plus sombres. Nous avons testé notre opérateur sur des images nocturnes, et nous l’avons comparé à deux mêmes opérateurs proposés par Ward [War94, WRP97], à la fois en termes de performance et d’apparence visuelle. Sur les deux situations étudiées (images de nuit, avec et sans phares dans le champ de l’image), notre opérateur donnait les meilleurs résultats pour les deux critères.

Notre principale publication est parue dans *ACM Transactions on Applied Perception* [GB08], présentant une synthèse de ces travaux. Nous avons comparé les performances de notre opérateur à quatre opérateurs classiques

[War94, WRP97, PFFG98, RSSF02]. Deux expérimentations ont été réalisées, mesurant les performances visuelles (anneau de Landolt) et l'apparence visuelle des images (préférence). Notre opérateur remplit l'objectif qui lui était fixé de préserver la perception des contrastes et l'apparence visuelle.

Nos travaux ont également été présentés dans le cadre de la Division 8 de la CIE [BG07]. Si l'objectif d'étude de la visibilité routière est principalement du ressort de la Division 4, la problématique de la qualité perceptive des images est traitée dans la Division 8.

Un aspect important de ce travail est que notre opérateur a été construit par rapport à une tâche visuelle (la détection) pertinente en conduite, et qu'il n'a été validé que pour des images routières. Ainsi, nous avons proposé un opérateur défini et validé par des besoins opérationnels pour une application spécifique (les études de visibilité routière), ce qui est sa principale originalité par rapport à la littérature.

6.2.3 Contribution : TMO dédié aux simulateurs de conduite

En conclusion de [GB08], nous disions que « *The main methodological step of further work would be to adapt this methodology to changing situation, as is the case for driving simulations. (...) Such an improvement may include motion detection and temporal visual adaptation issues.* » En effet, le TMO proposé dans [GB08] considère des images « statiques » plutôt que des flux vidéos. Même si on peut imaginer de l'implémenter, image par image, à la sortie d'une boucle visuelle de simulateur de conduite, il est optimisé pour une tâche statique, sans considérer les aspects dynamiques de la vision.

Bien que des opérateurs dynamiques aient été proposés [PTYG00, IFM05], l'application des TMO à des situations temps réel comme la simulation de conduite n'est pas immédiate. Le premier obstacle est l'architecture du pipe-line graphique des simulateurs eux-même, qui doit produire des images HDR pour que l'idée même de *tone mapping* ait un sens (Cf. section 6.1.2 et Fig. 6.8).

Le deuxième obstacle est celui du temps réel, pour lequel plusieurs solutions algorithmiques sont possibles, y compris la programmation de FPGA¹⁰ [HC07]. L'approche que nous avons privilégiée avec J. Petit utilise les *pixel shaders* (Cf. section 6.1.2).

Le troisième est celui de l'évaluation de la qualité du rendu. Une des difficultés est qu'à ce jour, l'évaluation de la qualité des TMO n'a été faite que pour des situations statiques, alors que l'essentiel des applications des images de synthèse (vidéo, télévision, cinéma, jeux vidéos... et simulateurs de conduite) proposent des images dynamiques. Nous pensons que l'évaluation dynamique des TMO peut être abordée à partir d'un modèle de vision capable de prédire l'orientation du regard dans des images dyna-

¹⁰FPGA : Field Programmable Gate Array.

miques, ce qui conduirait à une métrique sur les images, ou plutôt sur les vidéos [PBT08, PBT09a]. Nous avons donc proposé d'utiliser, pour les images dynamiques, un nouveau critère à la fois par rapport à la notion de visibilité des différences [Dal93], classiquement utilisé en codage vidéo [Win05], et par rapport aux critères proposés pour les *TMO* « statiques » (apparence visuelle, réalisme, immersion). Nous considérons ainsi que le critère le plus pertinent pour la qualité visuelle sur simulateur est l'attention visuelle [Knu07]. Cette approche peut s'implémenter en utilisant des cartes de saillance calculées sur les images projetées.

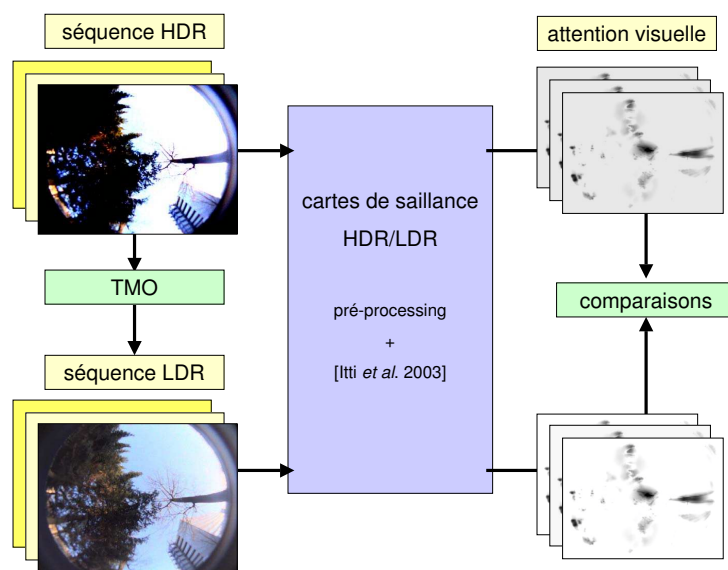


FIG. 6.15 – Principe de l'évaluation d'un *TMO* dynamique sur un critère d'attention visuelle. Les cartes de saillance calculées sur la vidéo *HDR* et sur la vidéo *LDR*, après *tone mapping* sont comparées.

A partir de cette idée, une méthode d'évaluation des *TMO* est en cours d'élaboration [PBT09a]. Nous avons utilisé pour cela un modèle de calcul reconnu et validé de la saillance visuelle pour des séquences dynamiques en *LDR* [IDP03]. Ce modèle correspondait à notre besoin et fonctionne sur des images 8 bits classiques, mais nous avons mis en évidence ses défauts pour les images *HDR* : focalisation sur un seul point saillant, perte d'information dans la carte de saillance. Partant de ce constat, nous avons proposé des méthodes alternatives pour calculer la saillance visuelle sur des images *HDR* (Cf. section 6.3.2). Notre motivation était que la pertinence de la méthode que nous proposons pour évaluer les *TMO* dépend de la validité du modèle de calcul de saillance *HDR*.

Un *TMO* peut être performant du point de vue de la vision dynamique

(mesuré avec un critère d'attention visuelle), cela ne garantit pas qu'il sera performant pour d'autres critères, jugés ici moins importants, puisque les modèles de vision correspondant ne sont *a priori* pas corrélés (Cf. section 6.3.1). Il peut donc être utile de compléter l'évaluation dynamique des *TMO* par des critères « statiques », ce qui donnerait des indicateurs de qualité complémentaires. Pour les simulateurs de conduite, nous proposons une évaluation sur deux critères complémentaires, la saillance visuelle (critère objectif, évalué avec une métrique vidéo) et l'immersion, évaluée avec une expérimentation sur des sujets, en posant la question du réalisme des scènes routières simulées. Cette double évaluation est actuellement mise en oeuvre dans le cadre de la thèse de J. Petit.

6.3 Perception des images et modèles de vision humaine

Nous avons utilisé, dans plusieurs applications, des modèles de vision humaine appliqués à des images routières : visibilité de petite cible [Adr89] dans [HTB07, DBH08], Anneau de Landolt et apparence visuelle dans [GB08], attention visuelle [IK00] dans [PBT08]. D'autre part, nous nous sommes intéressés à l'acquisition d'images en unités physiques (luminance, chrominance) à l'aide de capteurs optiques calibrés (négatif et scanner) dans [Bou00].

A plusieurs reprises, nous nous sommes heurtés à des problèmes de perception des images. Nos motivations étaient liées, à chaque fois, à l'insuffisance des modèles de vision utilisés dans la littérature pour prédire la « qualité » des images. Nous sortons donc ici du domaine de la visibilité routière, mais nos résultats ont des conséquences pratiques pour l'utilisation des images routières.

6.3.1 Contribution : Qualité perceptive des images

De nombreuses métriques d'images sont basées sur des modèles de vision. L'évaluation de la qualité des images consiste à comparer une estimation physique de la scène réelle, à partir d'un calibrage du capteur, à une estimation physique de la scène visualisée sur écran, à partir d'un calibrage de l'écran de visualisation (Fig. 6.16).

A partir des questions que nous nous posons sur le « réalisme » des images, du point de vue de l'apparence, de la performance visuelle des observateurs ou de l'attention, nous avons essayé avec J.-P. Tarel, E. Dumont et N. Hautière, de généraliser le problème en confrontant les différentes familles de métriques d'images classiquement utilisées [BTDH]. Nous avons proposé de décrire la qualité perceptive des images à partir de trois indices qui estiment cette qualité en termes de performance visuelle, d'appa-

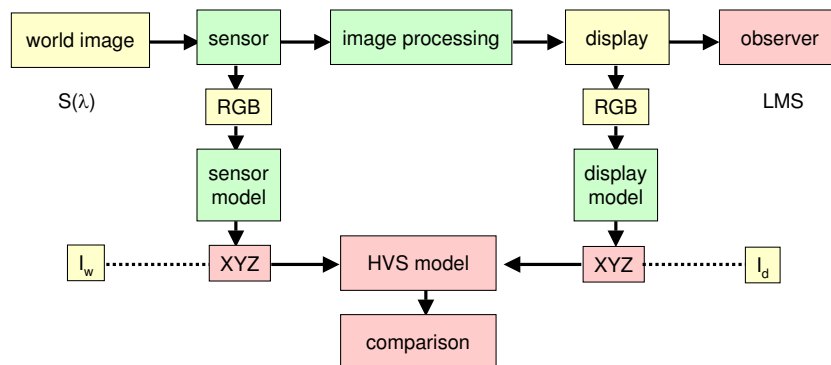


FIG. 6.16 – Principe de la comparaison entre une image I_w représentant la scène enregistrée par le capteur et une image I_d représentant la scène observée à l'écran.

rence visuelle et d'attention visuelle. Nous utilisons les modèles classiques de Daly [Dal93, MDMS05] (VDP, performance visuelle), Moroney *et al.* [MFH⁺02] (CIECAM02, apparence visuelle), et Itti *et al.* [IKN98] (sillance, attention visuelle). Nous avons montré sur quelques exemples de transformation d'image (filtrage gaussien, *gamut mapping*, *tone mapping*, compression JPEG) que les trois modèles cités conduisent à des indices de qualité d'image très faiblement corrélés (Fig. 6.17).

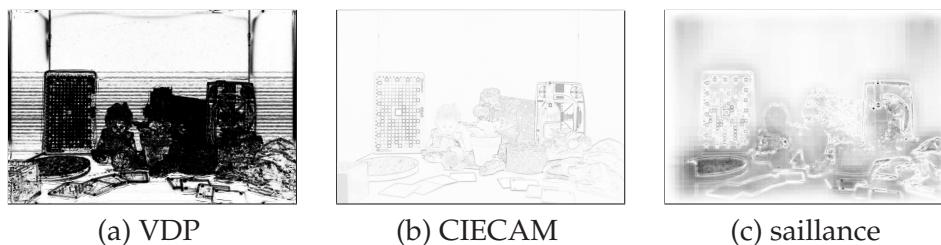


FIG. 6.17 – L'image *raw* « Petite Lucie » éclairée sous D65 après un filtre Gaussien. Cartes normalisées de l'erreur perceptive entre la scène physique et l'image projetée à l'écran, du point de vue (a) des performances visuelles (visibilité, modèle VDP), (b) de l'apparence visuelle (apparence colorée, modèle CIECAM), et (c) de l'attention visuelle (sillance, modèle de Itti *et al.*).

Ce constat nous a conduit à recommander une grande vigilance lorsqu'on souhaite utiliser une métrique perceptive pour juger de la qualité des images, puisque selon le modèle utilisé (ou la fonction visuelle modélisée) on risque de ne pas trouver les mêmes résultats. Nous pouvons parler de modèles de vision « partiels », car nos résultats incitent à utiliser une description de la qualité des images à plusieurs composantes.

Lors de ce travail, nous avons en outre abordé la question du calibrage des capteurs optiques, notamment l'aspect spectral (Cf. [MN99] pour le calibrage du point de vue des intensités), ainsi que la calibration des écrans [CIE96]. Pour les besoins de cette recherche, nous avons mis en oeuvre avec R. Hubert la calibration d'un appareil numérique Nikon D200 à l'aide d'un monochromateur.

6.3.2 Contribution : Cartes de saillance pour des images HDR

Comme nous l'avons vu section 6.2.3, le calcul de la saillance visuelle *bottom-up* sur des images *HDR* pose un problème avec les algorithmes proposés par L. Itti [IKN98, IK00, IDP03]. Autant ces algorithmes ont été en partie validés sur des images *LDR*, autant il n'existe pas à notre connaissance de données oculométriques sur des images *HDR* qui permettent de valider un modèle d'attention. Une telle validation est pourtant nécessaire, pour faire confiance au caractère prédictif de l'attention visuelle telle qu'elle est définie dans la carte de saillance visuelle.

C'est pourquoi nous avons réalisé avec J. Petit une expérimentation d'oculométrie afin de comparer les fixations oculaires d'observateurs face à une scène physique *HDR* aux prédictions de différents algorithmes. Cette expérimentation psycho-visuelle nous a conduit à adapter un protocole expérimental proche de celui de Itti *et al.* [Itt04a].

Parallèlement à cette expérimentation, nous avons construit une image *HDR* de la scène, en suivant la méthode de prise de vue à plusieurs temps de pose [DM97]. Finalement, nous avons pu comparer les prédictions de différents modèles de calcul de la saillance sur cette image, par rapport aux fixations oculaires enregistrées.

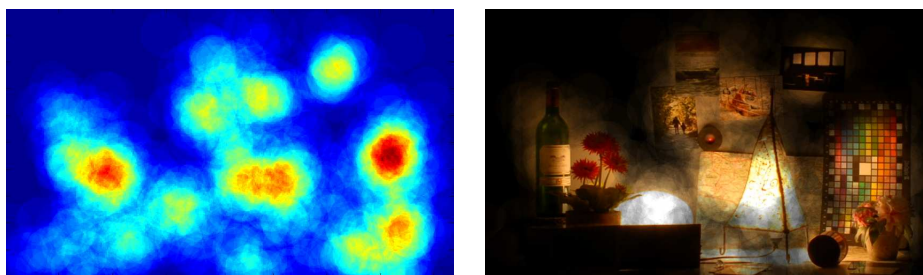


FIG. 6.18 – Carte de fixations (moyenne sur 17 observateurs). A gauche, en fausses couleurs. A droite, en sur-impression avec la scène originale.

Nous avons ainsi pu montrer les lacunes du modèle de Itti *et al.* [IK00] pour des images *HDR*, et proposer une alternative qui conduit à de meilleurs résultats [PBT09b]. Toutefois, nos résultats restent décevants à ce stade, dans la mesure où notre modèle, s'il améliore l'état de l'art, est encore loin d'un modèle prédictif de l'attention sur des scènes *HDR*.

6.4 Bilan et perspectives

En termes de publications, les principales contributions sont les articles de *ACM Transaction on Applied Perception* et *Visual Computer* [GB08, PB10b]. On mentionnera également les articles dans le Bulletin de Liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées [Bré02d] et dans la Revue Francophone d'Informatique Graphique [PBT09a], ainsi que 3 posters avec *abstract* dans des conférences ACM (APGV et VRST) [GB05b, PBT09b, PB09], et des présentations aux conférences CGIV et VRIC [VBB02, BG02].

6.4.1 Calcul des images de synthèse

Les points forts de nos travaux sur le rendu des textures sont d'avoir identifié un problème de réalisme du rendu des algorithmes de radiosité, et d'avoir proposé une solution pour laquelle nous avons pu montrer qu'elle améliorerait le réalisme colorimétrique pour des matériaux routiers sous éclairage artificiel. Le principal point faible est l'absence de publication significative. De plus, les perspectives sont limitées par rapport à notre démarche scientifique, dans la mesure ou même si le rendu des textures est un problème scientifique légitime, l'enjeu vis-à-vis de la visibilité routiere paraît faible, et explique que nous n'ayons pas poursuivi dans cette voie.

Concernant le calcul d'éclairage en synthèse d'images, ils s'agit d'un travail à cheval entre recherche et développement. Le principal point positif, sur le plan de l'ingénierie, est le fait que les résultats ont été intégrés à une chaîne industrielle, celle d'Oktal, pour générer des bases de données pour la simulation de conduite et l'aménagement virtuel. Du point de vue académique, l'idée la plus féconde concerne l'évaluation des résultats algorithmiques par une métrique perceptive, directement dans les scènes virtuelles [Br 02d]. Le principal point faible de ce travail est l'échec des tentatives de trouver un diffuseur externe au logiciel LISE-LCPC, du fait de la faiblesse du marché potentiel. Le logiciel n'est plus maintenu, car le LCPC, EPST¹¹ depuis 1998, n'a pas de mission de bureau d'étude, et des concurrents sont apparus avec un meilleur modèle de développement (e.g. *Radiance* [WS98] en *Computer Graphics*, Ing lux¹² et Phanie¹³ dans le domaine de l'éclairage, etc.).

En images de synthèse, la solution technique développée en 2000-2002 (*multi-texturing*) est aujourd'hui obsolète, et nous avons renouvelée notre approche avec J. Petit en utilisant des *pixel shaders*. L'approche proposée permet de prendre en compte conjointement des sources lumineuses fixes et mobiles, ce qui n'était pas le cas auparavant.

¹¹EPST : Etablissement Public à caractère Scientifique et Technologique.

¹²Ing lux : <http://www.ingelux.com/>, développé par l'ENTPE.

¹³Phanie : logiciel de calcul d'éclairage développé par le CSTB.

Ces travaux ont ouvert un certain nombre de voies de recherche pour améliorer les images de synthèse destinées aux études de visibilité routière :

- Le calcul photométrique approché de la propagation de la lumière dans des scènes virtuelles (éclairage public et automobile) ;
- La production de bases de données HDR pour la réalité virtuelle, à partir de bases de données LDR existantes ;
- L'évaluation des résultats d'un calcul d'illumination globale (radio-sité) ou locale (textures) avec des métriques perceptives : *JND* dans [Bou00], *VL* dans [Bré02d] ;
- Le contrôle de la chaîne de production des maquettes virtuelles : mesures photométriques, calcul de la propagation de la lumière et rendu visuel.

6.4.2 Visualisation des images

Le point fort de notre collaboration avec le MNHN a été la définition d'un protocole expérimental pour l'évaluation psychophysique des *TMO*, et la distinction faite entre les critères d'apparence et de performance visuelle. Les points faibles sont la difficulté de mise en oeuvre de la référence physique (moteur, imprimante calibrée, etc.), et l'utilisation d'algorithmes qui ne sont plus *state of the art*. Nos contributions sont donc surtout méthodologiques.

Les points forts de la thèse de J. Grave sont la méthodologie expérimentale proposée, simplifiée par rapport à la précédente, et la proposition d'un algorithme adapté à la visibilité routière, y compris en prenant explicitement en compte la quantification. Le point faible de cette approche est sans doute la complexité de l'algorithme proposé, ce qui le rend difficile à mettre en oeuvre, notamment en temps réel.

La thèse de J. Petit est en cours. Le point fort jusqu'ici est l'exploration de l'attention visuelle (saillance) pour évaluer la qualité des *TMO* en situation dynamique, et l'implémentation temps réel d'un *TMO* sous *OpenSceneGraph*. C'est également la proposition d'un *pipeline* graphique pour faire du rendu *HDR* pour la réalité virtuelle. La difficulté majeure du travail sur l'évaluation des *TMO* en dynamique est que ce problème, scientifiquement légitime, se heurte au fait que les modèles existants de l'attention visuelle ne sont pas assez prédictifs, et donnent donc des résultats décevants.

6.4.3 Perception des images

Les questions abordées portent sur les modèles de vision humaine appliqués aux images. Nous y avons été confrontés lorsque des verrous scientifiques sont apparus, dans l'utilisation des modèles de vision, pour nos applications : les métriques d'image basées sur des modèles de vision sont-elles équivalentes ? Les cartes de saillances calculées d'après les modèles

classiques sont-elles réellement prédictives de la saillance face à des scènes *HDR* ?

Sur les métriques perceptives, notre apport est conceptuel, on y voit plus clair entre les nombreuses métriques d'images fondées sur la vision humaine. Toutefois, si nous avons bien soulevé un problème, nous n'apportons pas à ce stade de solution concrète dans le cas particulier des images routières.

Sur le calcul de la saillance, nous avons réalisé une expérimentation qui remet en cause un modèle classique [IKN98] et ses dérivés dans un cas particulier, celui des images *HDR*. Nous avons proposé une solution qui améliore l'état de l'art mais qui se heurte toutefois à un problème général : la difficulté de faire un modèle prédictif de l'attention visuelle, parce que les facteurs internes (non liés à l'image elle-même) sont souvent déterminants et mal connus [Knu07]. La saillance attentionnelle (involontaire) contient à la fois une composante ascendante et une composante descendante, cette dernière étant très difficile à modéliser de manière quantitative. Une approche pour résoudre cette contradiction dans un cas particulier a été d'essayer de développer un modèle de saillance incluant des connaissances *a priori* : c'est l'approche qui a été suivie avec L. Simon (Cf. section 5.1.2).

Chapitre 7

Conclusion et Perspectives

Au terme de cette présentation synthétique de nos activités de recherche au LCPC puis au LEPSiS, nous proposons ci-dessous une synthèse des principaux résultats obtenus (chapitres 4, 5 et 6) en termes de publications, d'encadrement et de collaborations. Nous confrontons nos résultats à la démarche scientifique proposée, pluri-disciplinaire et orientée vers une application, la visibilité routière (chapitre 3). Enfin, nous proposons les grandes lignes de travaux de recherche futurs, à l'interface entre image et vision humaine, en nous attachant à intégrer nos recherches dans les structures organisationnelles existantes ou en formation (LEPSiS, Département « Infrastructures » du LCPC, fusion INRETS-LCPC).

7.1 Publications, collaborations et encadrement

Notre approche délibérément pluri-disciplinaire s'est traduite par des publications à la fois en SHS et en SPI, à la fois dans des congrès et des revues scientifiques et appliquées. Nous avons ainsi obtenu des publications dans six revues académiques de premier plan : *Journal of Microscopy* en traitement d'images, *Visual Computer* et *ACM Transactions on Applied Perception* en synthèse d'images, *Human Factors*, *Applied Ergonomics* et *Transportation Research : Part F* en psychologie, ainsi qu'une revue moins importante (Revue Française d'Informatique Graphique) en synthèse d'images, alors qu'un article est en cours d'instruction dans le *Journal of Electronic Imaging*. Parallèlement, nous avons publié dans quatre revues de recherche appliquée : la Revue de Métallurgie et Matériaux, le Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, *Advances in Transportation Studies* et Recherche Transports Sécurité (Cf. Tab. 7.1).

Notre avons été sollicités pour expertiser des articles pour des revues et conférences à la fois académiques (*Computer Graphics International*, *Journal of Electronic Imaging* et *Ophthalmic and Physiologic Optics*) et appliqués (Recherche Transports Sécurité, colloques COPIE). Nous avons également

Catégorie	nb.	Nom	accept.	index	IF
Revue int.	8	<i>Visual Computer</i>	10	WoS	1.06
		<i>Applied Ergonomics</i>	09	WoS	1.25
		<i>Transp. Res. F</i>	09	WoS	1.40
		<i>Human Factors</i>	08	WoS	1.53
		<i>ACM TAP</i>	07	WoS	
		<i>Adv. Transp. Studies</i>	07	EI	
		<i>Rev. de Mét. et Mat.</i>	95	WoS	0.05
		<i>J. Microscopy</i>	94	WoS	1.41
Soumis	1	<i>J. Elec. Im.</i>	–	WoS	0.56
Revue franc.	3	Rev. Fr. Inf. Graph.	09		
		Rech. Transp. Séc.	08		
		Bul. Lab. P&C	02	EI	
Coord. ouvrages	2	Et. et Rech. des LPC	07/03		
Conf. int.	27	VRU	10		
		TRA	10		
		IEEE IV	09	WoS	
		ISAL	09		
		VISAAP	08	WoS	
		RSS (2)	09/07		
		ITS World (2)	08/07		
		ICTCT	07		
		IEEE ICCP	07	WoS	
		VIV	06		
		VIIP	05	EI	
		CIE (5)	07/03		
		CGIV	02	WoS	
		VRIC	02		
		DSC (3)	02/01/99		
		PMCI	97		
MMIP (2)	96/94				
GW	94				
Poster abstracts	5	ECVP	09	WoS	1.36
		ACM VRST	09	EI	
		ACM APGV (2)	09/05	EI	
		Mem. Sci. Rev. Met.	95		
Conf. Nat.	14	AFIG (5), etc.	97-09		

TAB. 7.1 – Principales publications. *WoS* : référence dans le *Web of Science*. *EI* : *Engineering index*. *IF* : Facteur d'Impact (*Journal of Citation Report*, 2008). En **gras** : premier auteur, ou second auteur avec un thésard.

édité deux compilations pluri-disciplinaires d'articles portant sur des thématiques applicatives (sur la vision nocturne, et sur la simulation de conduite) dans une collection des éditions du LCPC (Etudes et Recherches).

Depuis notre arrivée au LCPC en 1996, nous avons développé des collaborations en synthèse d'images avec B. Péroche à l'université de Lyon I (et auparavant à l'Université de Saint-Etienne) dans le cadre de stages de DEA et de thèses (G. Pouliquen, B. Mordelet, J. Grave, J. Petit). Nous avons parallèlement développé des collaborations en vision humaine avec l'ENST (H. Brettel, thèse de V. Boulanger) et avec le MNHN (F. Viénot), avec l'INRETS sur la simulation de conduite et la simulation de trafic (J.-M. Auberlet, A. Tom, I. Giannopulu), et avec Oktal en réalité virtuelle (G. Gallée, stages de V. Tron et V. Lux). Enfin, une collaboration avec Paris Descartes puis avec l'Université de Metz en ergonomie a permis de contribuer à l'étude de la vision en conduite nocturne (C. Bastien, thèse de A. Mayeur).

Notre parcours a été reconnu par des participations à 4 jurys de thèse : celles de V. Boulanger (dir. H. Brettel, ENST), J. Grave (dir. B. Péroche, LIRIS), et P. Rousseau (dir. D. Ghazanfarpour, XLIM) en synthèse d'images, celle de A. Mayeur (dir. R. Mollard, Paris Descartes) en ergonomie. Nous avons également participé aux jurys de E. Lugand (mémoire de fin d'études, Ecole Louis Lumière, dir. P. Marchand et V. Biri), de S. Lay (master de synthèse d'images, Université de Marne la Vallée, dir. S. Michelin) et de X. Janc (master de management public, ENPC).

Nos compétences dans le domaine de l'éclairage public se sont également traduites par des expertises pour la Direction des Routes du MEEDDM et pour Eiffage TP (viaduc de Millau), et par une participation à des groupes de travail (CERTU, ADEME, AITF). Notre expertise est plus largement reconnue dans le domaine des transports, puisque nous avons été sollicités par le PREDIT en 2008 et 2009 pour expertiser des projets FUI.

Pour mieux cerner notre domaine d'activité qui est à l'interface de plusieurs disciplines, nous avons comptabilisé les étudiants encadrés, ainsi que les articles de revue et de conférences de manière à identifier les thématiques abordées (un même article peut participer à plusieurs thématiques, et c'est d'ailleurs souvent le cas). Cette « comptabilité » aboutit au résultat suivant (Cf. Tab. 7.2) :

- Quinze étudiants encadrés, dont 9 en synthèse d'images, 7 en vision et 4 en psychologie expérimentale.
- Onze articles dans des revues (+1 en cours de *review*), dont 3 en synthèse d'images, 3 en traitement d'images, 8 en vision et 6 en psychologie cognitive.
- Trente-neuf articles dans des conférences, dont 23 en synthèse d'images, 14 en vision humaine, 13 en psychologie cognitive, 13 en traitement d'images et 11 en éclairage et photométrie.

Cinq étudiants sur 14 avaient des thématiques explicitement pluri-disciplinaires

(en général, SHS/SPI), ce qui est également le cas pour les deux ERLPC¹ publiés, 6 des 11 articles de revue et 25 articles de conférence sur 39.

Nom	Cat.	Etablissement	Domaine	date
S. Lay	DEA	Univ. MIV	SI	1997
V. Boulanger	Thèse	ENST	SI / Vision / TI	1997-2000
G. Pouliquen	DEA	Univ. St Etienne	SI	1999
B. Mordelet	DEA	Univ. St Etienne	SI	2000
V. Lux	DESS	Univ. Bordeaux	SI	2001
X. Janc	Mastère	ENPC	Management	2001
V. Tron	DESS	Univ. Bordeaux	SI	2002
J.-P. Caruana	Ing.	ENSM Albi	Métrologie	2002
J. Grave	Thèse	Univ. Lyon I	SI / Vision / PE	2003-2006
J. Andoche	Ing.	ENSIMAG	SI	2004
M. Deugnier	Master 2	Univ. Paris V	PE / Vision	2005
R. Gallen	Master 2	Univ. Paris VI	TI / Vision	2005
A. Mayeur	Thèse	Univ. Paris V	PE / Vision	2006-2009
J. Petit	Thèse	Univ. Lyon I	SI / Vision / PE	2007-
U. Ketenci	Thèse	Univ. Valenciennes	IA / Vision	2009-

TAB. 7.2 – Encadrement d’étudiants. SI : Synthèse d’images. TI : Traitement d’images. PE : Psychologie expérimentale. IA : Intelligence Artificielle.

7.2 Retour sur la démarche

Au terme de cette synthèse de nos activités de recherche, il nous semble que la fécondité de l’approche pluri-disciplinaire pour l’étude des différents aspects de la visibilité routière n’est pas le fruit du hasard, mais qu’elle est liée à la complexité du problème soulevé, au sens ou l’entend E. Morin [Mor90, Mor86]. La production de connaissances scientifiques, depuis Descartes, s’est appuyée sur une démarche analytique, qui aborde le réel en isolant des problèmes simples, pour mieux les résoudre [Des37]. Le développement de la science depuis 3 siècle a largement montré la fécondité de cette méthode, mais ce succès a occulté certaines limites de la démarche. Les principales sont la simplification du réel, qui est assimilé au aspects du Monde dont la *Méthode* cartésienne parvient à rendre compte, c’est-à-dire à ses aspects les plus simples ; et la pensée disjonctive (disciplinaire, au sens académique), qui masque les interactions entre les différents aspects du réel. En réaction, Morin parle de *pensée complexe* pour décrire une approche dont « *l’ambition est de rendre compte des articulations entre des domaines disciplinaires qui sont brisés par la pensée disjonctive (qui est un des aspects majeurs*

¹ERLPC : Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées.

de la pensée simplifiante) » [Mor90].

Notre approche de la visibilité routière, à la fois comme un problème lié à la perception humaine et à la situation de déplacement dans un système de trafic, lui donne d'emblée un certain nombre de caractéristiques (dont nous n'avons pris conscience que progressivement) propres à se heurter à ce que Morin appelle la pensée disjonctive. Lorsqu'on se demande quels sont les facteurs qui déterminent la perception dans les déplacements, on fait face à des éléments de réponse issus de différents domaines académiques (physique, photométrie, informatique, vision humaine, psychologie), et on est amené à se poser la question de l'inter-dépendance entre ces réponses qui s'ignorent pour une très grande part.

De plus, l'analyse de Morin met en évidence des caractéristiques qui semblent pertinentes, à la fois au niveau du sujet (la perception) et du système dynamique émergent (le trafic routier). En particulier, on relèvera :

- l'émergence d'un système auto-organisé, le trafic routier, dans un système ouvert : l'équilibre est lié à des flux entrants et sortants, comme dans l'équilibre cellulaire, et non pas à des forces qui s'annulent, comme dans un problème de mécanique statique ;
- l'interaction continue et dynamique entre sujet (l'automobiliste) et objet (l'environnement). La perception est au cœur des sciences cognitives, puisqu'elle constitue l'interface entre le sujet et son environnement. Le sujet percevant est donc également un système ouvert auto-organisé, qui *compute* (résout des problèmes) à partir de l'information extraite de l'environnement.

On observera que malgré le découpage du présent mémoire en trois sous-thématiques (« voir », « regarder », « images », Cf. chapitres 4, 5 et 6), la plupart des travaux cités se trouvent à cheval entre les champs académiques de l'image et de la vision humaine. Par exemple, les travaux menés avec F. Viénot, puis J. Grave et J. Petit en synthèse d'images prennent une valeur particulière grâce à l'utilisation des méthodes de la psychologie expérimentale, de même que ceux de L. Simon en traitement d'images. Nos travaux en synthèse d'images consistent principalement à utiliser des modèles de vision et des données photométriques dans la production de scènes virtuelles. De la même manière, les travaux menés avec V. Boulanger portaient à la fois sur le traitement, la synthèse d'images et la photométrie, et les recherches en cours avec J.-M. Auberlet ont pour but d'utiliser des modèles de perception en intelligence artificielle. Réciproquement, les recherches de A. Mayeur sur la visibilité routière s'appuient notamment sur des images de synthèse et des vidéos dont on contrôle la photométrie. L'article en cours de soumission au *Journal of Electronic Imaging* est typique de ces interactions fructueuses, à cheval entre analyse d'images et modèles de vision, au point qu'il a été difficile de choisir une revue pour la soumission (une première soumission à *JOSA-A* a été rejetée).

L'animation d'une équipe de recherche pluri-disciplinaire entre 2001

et 2005 (vision, photométrie, synthèse d'images, urbanisme) autour d'une thématique commune : la perception dans les déplacements, nous a sans aucun doute sensibilisé à la prise en compte des nombreuses facettes de cette question (ce qui n'a d'ailleurs rien d'original en recherche finalisée), et dans un deuxième temps, à l'interaction complexe entre ces facteurs dans les situations réelles. Cela s'est traduit, par exemple, dans le Projet de recherche pluri-disciplinaire VIZIR (SPI/SHS) que nous avons monté et piloté pour le compte du LCPC, et auquel ont participé des acteurs de différentes sensibilités, à la fois théoriques (SPI/SHS) et par rapport aux applications visées (chercheurs, industriels, CETE et collectivités locales). Notre implication dans les Groupements d'Intérêt Scientifique pluri-disciplinaires *Aménagement Virtuel* (Polytechnicum de Marne-la-Vallée) et *Simulation pour les Recherches sur la Sécurité Routière* (LCPC-INRETS-CHU) va dans le même sens, dans des structures plus informelles.

Surtout, la création du LEPSiS en 2009, à laquelle nous avons contribué, constitue à la fois un point de départ et un aboutissement. Cette UMR pluri-disciplinaire INRETS/LCPC est née d'un ensemble de paris, sur l'intérêt d'une approche SPI/SHS au sein d'une même équipe (comme on peut l'avoir, à une échelle plus grande, au LIMSI à Orsay ou au LAMIH à Valenciennes), et sur la réalité virtuelle comme outil de recherche et comme objet de recherche, notamment autour de la vision et des images de synthèse. Une des thématiques transversales porte notamment sur le contrôle de la « chaîne visuelle » sur les simulateurs de conduite, depuis les mesures photométriques jusqu'à la visualisation des images de synthèse en réalité virtuelle, et constitue un des enjeux majeurs de développement de l'UMR.

Le positionnement de cette UMR est complémentaire des laboratoires universitaires, que ce soit en synthèse et en traitement d'images, en réalité virtuelle, en ergonomie et en psychologie expérimentale, puisqu'elle tire son sens d'être issue de deux laboratoires de recherche finalisée, avec une vocation à traiter des questions de recherche liées à des applications aux transports et aux infrastructures routières. Ce point de départ dans le réel, propre à la recherche appliquée, légitime également un parti pris pluri-disciplinaire, qui doit permettre de tirer parti, comme nous avons tenté de le monter tout au long de ce mémoire, de l'éclairage simultané de différentes disciplines.

Une de nos ambitions dans ce document était d'illustrer la fécondité d'une approche pluri-disciplinaire. Loin d'aboutir à une juxtaposition de contributions dans différents domaines académiques et appliqués, elle nous a permis de mettre en évidence des interactions entre disciplines, tant sur les modèles de vision en conduite automobile qu'en synthèse d'images autour de la simulation de conduite, grâce à l'apport conjugué des différents domaines académiques mobilisés. Nous pensons ainsi que notre travail fait émerger la visibilité routière comme une problématique scientifique légitime. Bien entendu, différents aspects de cette question avaient été abordés

depuis longtemps, en éclairage public, en psychophysique ou en synthèse d'images. Notre contribution porte principalement, à notre sens, sur le fait d'avoir mobilisé les disciplines académiques pertinentes pour résoudre des questions concrètes et faire sauter des verrous scientifiques posés par le domaine d'application que nous avons abordé, la **visibilité routière**, et dont nous avons ainsi montré la **complexité**.

7.3 Perspectives de recherche

Nous proposons ci-dessous des perspectives de recherches à partir des travaux réalisés, en mettant principalement l'accent sur des priorités qui se dégagent des enjeux, à la fois au niveau des besoins de la recherche appliquée (par exemple sur le rendu d'images *HDR*, sur la saillance des objets routiers, sur la prise d'information par les piétons), et au niveau de notre démarche personnelle de recherche, en faisant des propositions sur la manière dont notre approche peut s'appliquer utilement à de nouveaux domaines.

A partir de l'objet complexe que constitue le sujet percevant et ses interactions avec le trafic, l'analyse de Morin sur les systèmes auto-organisés suggère plusieurs pistes pour faire évoluer nos recherches vers le coeur d'un problème que nous avons abordé, jusqu'ici, par une méthode d'encerclements successifs. Les insuffisances de la théorie de l'information, encore prépondérante dans l'approche psycho-physique de la vision mais aussi en traitement d'images, doivent être comprises pour surmonter les impasses que nous avons commencé à rencontrer [BDLM], et qui sont liées à des simplifications qui ne rendent pas compte du réel. La notion d'auto-exo-organisation, en mettant l'accent à la fois sur l'aspect dynamique de l'interaction entre sujet et environnement [HA94] et sur la *computation* de l'environnement par le sujet, nous suggère également une piste qui synthétise (sur un mode différent de ce qui a été proposé ailleurs sur la conscience de situation [End95]) les différents aspects de notre travail autour d'une notion de perception finalisée.

7.3.1 Voir

Concernant le calcul de visibilité dans les images routières, nous n'avons à ce jour que commencé avec N. Hautière à explorer les possibilités algorithmiques offertes par l'usage analogique des modèles de vision en analyse d'image. En confrontant ces premiers travaux avec ceux réalisés avec J. Petit en synthèse d'images, il nous semble que se dégage un paradigme intéressant, qui est l'interprétation physique et photométrique des images. Il s'agit en fait d'une vieille idée, déjà utilisée par Stockham il y a près de 40

ans d'une autre manière [Sto72]. Ces premiers travaux devraient se poursuivre à partir de l'automne 2010 par une thèse en cours de montage.

D'autre part, les méthodes d'évaluation de la visibilité dans des images, telles que nous les avons utilisées depuis nos travaux avec F. Viénot, et plus généralement les méthodes psychophysiques d'évaluation de la « qualité » des images fournissent des outils quantitatifs permettant de comparer des algorithmes (traitement d'images ou synthèse d'images) à partir de jugements ou de performances d'observateurs auxquels on propose une tâche visuelle face à ces images. Ces méthodes, pour lesquelles nous avons maintenant développé une expertise, devront être mises en oeuvre en fonction des questions rencontrées.

Concernant les suites du Projet VIZIR et le problème de la validité de notre modèle de diagnostic de la visibilité nocturne, notre objectif avec E. Dumont est de passer d'un modèle déterministe, où la cible virtuelle possède une réflectance arbitraire, à un modèle probabiliste, basé sur une distribution la plus réaliste possible des coefficients de réflexion des objets rencontrés sur la chaussée, par exemple à partir d'un recueil de données photométriques par le système de vidéo-photométrie embarqué Cyclope, développé au LRPC d'Angers [BGF08].

Sur les modèles de visibilité, et notamment le niveau de visibilité *VL*, les perspectives ouvertes par la thèse de A. Mayeur sont de deux ordres. D'une part, des pistes ont été proposées pour prendre en compte, dans le calcul de la visibilité routière, des facteurs qui sont négligés par les praticiens, comme l'activité de conduite, la dynamique visuelle, la sémantique de la scène et l'excentricité de la cible. Nous souhaitons étendre ces résultats et évaluer l'impact d'autres facteurs comme le trafic, la nature de la cible et le type d'environnement routier. Au niveau des professionnels de l'éclairage (AFE, CIE), l'objectif est de convertir ces résultats qualitatifs en un modèle de visibilité quantitatif plus prédictif que le *VL* des performances visuelles en conduite.

Plus largement, les perspectives de l'approche ergonomique pour l'étude de la visibilité routière dépassent les travaux menés sur la visibilité nocturne. Les résultats obtenus jusqu'ici nous incitent à poursuivre cette approche pour d'autres aspects de la conduite, notamment la conduite en ville, à travers les notions de tâche de conduite et de charge mentale.

7.3.2 Regarder

Sur la prise d'information visuelle dans les déplacements, L. Simon a proposé dans sa thèse un modèle de calcul de la saillance de recherche pour des panneaux de signalisation. Si l'objectif d'un modèle informatique *top-down* de la saillance visuelle reste parfaitement légitime et doit être poursuivi, la principale limite identifiée est la difficulté à obtenir une référence objective sur la saillance des objets routiers en conduite automobile. De ce

fait, la priorité des recherches futures concerne l'acquisition de telles données à l'aide du véhicule instrumenté (oculométrie) développé au LRPC de St Briec par L. Désiré. Cette direction de recherche est d'ailleurs cohérente avec l'équipement récent dans le RST en matériel oculométrique (R. Lobjois au LEPSiS, V. Boucher au LRPC Angers, L. Désiré au LRPC St Briec), et nous avons mis en place, au sein de l'action RST-Vision piloté par E. Dumont, un groupe de travail pour partager l'expérience acquise par les utilisateurs de ces systèmes.

Parallèlement, le travail réalisé avec J. Petit sur le calcul de la saillance d'images HDR devra être poursuivi et élargi, notamment en intégrant des composantes *top-down* aux modèles *bottom-up* de l'attention visuelle. Cela peut passer par une phase d'apprentissage comme l'ont proposé J.-P. Tarel et L. Simon, mais également par une segmentation sémantique des scènes routières, ce qui peut être envisagé en collaboration avec le LRPC de St Briec.

L'autre axe de recherche que nous avons initié sur la prise d'information visuelle concerne la modélisation de la perception en vue de la simulation de trafic microscopique. Nous abordons cette thématique à la fois du point de vue des piétons, avec le Projet SICAP, et du point de vue des automobilistes, avec la thèse de U. Ketenci. Dans le cadre du Projet SICAP, un dispositif de réalité virtuelle a été adapté, avec R. Rabier, pour la projection de vidéos panoramiques à des sujets qui sont mis en situation de traversée de rue, et il a été utilisé avec A. Tom pour étudier les indices visuels utilisés par les piétons pour traverser. La finalité de ce Projet est d'améliorer les modèles de simulation de trafic urbain actuels, en améliorant le modèle de décision de traversée. Les principales pistes envisagées consistent à jouer sur la fonction de perception et sur l'anticipation du comportement d'autrui, en s'inspirant du modèle d'Endsley [End95], comme cela a été fait d'une autre manière dans *Cosmodrive* [BTV99]. La théorie de l'attention doit également inspirer la thèse de U. Ketenci, qui vise à améliorer la perception, la représentation de la situation et l'anticipation dans un système multi-agent de simulation microscopique du trafic routier inspiré d'Archisim [Esp95, MCA⁺08].

Il nous semble, plus généralement, que la simulation multi-agent du trafic routier à partir de modèles psychologiques des conducteur (et des piétons) est un outil de compréhension, non seulement du réel, mais réflexivement, des modèles de perception sur lesquels nous travaillons. Une perspective ouverte ici porte donc sur l'intégration des différents aspects de la perception dans les déplacements au sein d'un tel modèle de simulation informatique.

7.3.3 Des images « réalistes »

En synthèse d'images, la solution technique développée il y a une dizaine d'années avec Oktal pour faire du rendu de scènes routières nocturnes temps réel a été renouvelée avec J. Petit en utilisant des *pixel shaders* pour faire du rendu HDR. L'objectif est d'avoir un modèle de calcul d'éclairage temps réel compatible avec la physique de la propagation de la lumière (malgré des simplifications importantes). L'approche proposée permet de prendre en compte conjointement des sources lumineuses fixes et mobiles, ce qui n'était pas le cas auparavant. Sur le plan conceptuel, l'architecture proposée nous semble devoir être mise en avant, avec une étape de calcul photométrique dans lequel une image physique est calculée, puis une phase de *tone mapping* au cours de laquelle les principales caractéristiques perceptives de l'image sont conservées.

L'objectif pour le LEPSiS est de contribuer à l'amélioration de la boucle visuelle des simulateurs de conduite, avec des bases de données HDR les plus réalistes possible du point de vue perceptif. A notre sens, cela passe notamment par une migration des simulateurs du LEPSiS de *Performer* vers *OpenSceneGraph* (ce qui est en cours, sous la Direction de F. Vienne), mais également par un rapprochement avec l'Université Paris Est, l'ESIEE et le CSTB sur les outils de réalité virtuelle. La question d'un rapprochement avec l'ENPC (projets SAFE) peut même être posée. Le PRES Paris Est, le GIS AV et le groupement CARNOT VITRES sont des cadres formels qui semblent pertinents pour cet objectif.

Globalement, l'objectif est le contrôle de la chaîne de production des maquettes virtuelles : mesures photométriques, calcul de la propagation de la lumière et rendu visuel. Cette notion de contrôle comporte deux aspects : la production des scènes virtuelles, et l'évaluation de la qualité des images du point de vue perceptif (notamment dans leur composante dynamique). Ce dernier point implique de développer des outils et des méthodes d'évaluation de la qualité du rendu visuel avec des métriques perceptives par traitement d'images, mais aussi avec les méthodes de la psychophysique et de la psychologie expérimentale. On peut dans ce dernier cas envisager des approches basées sur des jugements subjectifs [Win05], sur des performances visuelles [GB08], ou sur des comportements oculomoteurs [GBB⁺08].

En termes d'outils, l'acquisition d'un écran HDR comme celui dont *Sim2* a annoncé la commercialisation [Sim09a] est prévu au LEPSiS à travers le consortium CARNOT VITRES, ce qui doit permettre de faire un grand pas dans l'évaluation du rendu LDR des images HDR pour les applications à la réalité virtuelle.

Concernant la production des maquettes virtuelles pour la simulation de conduite, les principaux enjeux identifiés pour les années à venir sont le rendu HDR, avec la thèse de J. Petit et ses suites, et le rendu de la pluie et

des surfaces mouillées, sujet qui doit être abordé dans le projet FUI *SURVIE* (en cours de démarrage) et dans le projet *WET (PCRD)* en cours de ré-écriture².

7.4 Perspectives pratiques

Nos recherches s'inscrivent, naturellement, dans un ensemble de cadres formels, notamment en ce qui concerne les Projets contractuels ou en cours de montage. Il en va de même au niveau des structures : Groupements d'Intérêt Scientifique *SRSR* et *AV*, création du *LEPSiS* en 2009 et intégration au département « Infrastructures » du *LCPC* prévue en 2010, participation au *PRES*³ Paris Est, fusion en cours entre le *LCPC* et l'*INRETS*, enfin déménagement du *LCPC* Paris sur le Campus de Marne-la-Vallée en 2012.

Ces éléments de contexte permettent de décrire plus concrètement notre positionnement, à partir des trois lignes directrices indentifiées autour de la visibilité routière :

- La première porte sur les modèles de visibilité en conduite automobile, et nous conduit à poursuivre l'étude critique du *Niveau de Visibilité* afin de faire émerger un modèle alternatif plus utile pour les praticiens (*CNFE*, *CIE*). La psychologie expérimentale, et singulièrement l'ergonomie, nous semblent adaptées au versant « critique » du problème, tandis que des modèles de calcul relèvent de la vision, de la photométrie et de l'analyse d'images (e.g. projets ANR *DIVAS*, FUI *SURVIE*, thèse Valéo).
- La seconde porte sur la prise d'information en conduite automobile. L'objectif principal est de mieux décrire la nature et les caractéristiques des objets saillant durant la conduite, au sens de la sélection de l'information par les automobilistes et les piétons (Cf. projet *FSR SICAP*, et thèse en cours de montage avec le *LRPC* St Brieuc). L'oculométrie apparaît comme un outil incontournable, mais une description sémantique des scènes routières nous semble également nécessaire. Toutefois cette approche descriptive n'est pas un but en soi : elle doit permettre de valider les méthodes de calcul de la saillance des objets routiers par analyse d'image. Par ailleurs, la modélisation microscopique du trafic permet de confronter les niveaux microscopique (perception-comportement) et macroscopique (trafic) de la conduite, et va permettre d'implémenter des modèles d'attention en conduite automobile (thèse de U. Ketenci).
- Enfin la troisième voie de recherche porte sur l'utilisation des images de synthèse pour la simulation de conduite, avec le développement de nouvelles méthodes de calcul physique de la propagation de la

²projet piloté par X. Pueyo, Univ. Girona.

³*PRES* : Pôle de Recherche et d'Enseignement Supérieur.

lumière pour le rendu, ainsi que l'évaluation de la qualité perceptive des images en termes de performances visuelles et d'immersion dans l'environnement virtuel. La thèse de J. Petit aborde les deux aspects du problème, et le projet PCRD WET doit aborder un aspect important du rendu visuel sur simulateur : la conduite sous pluie et sur route mouillée. Par ailleurs, cette double approche *production/évaluation des images de synthèse* pour des applications en réalité virtuelle sera défendue dans le cadre des GIS SRSR et AV.

Le LEPSiS est né en janvier 2009 autour de trois thématiques scientifiques : la vision (humaine et artificielle), la réalité virtuelle (simulation de conduite) et la modélisation des déplacements (trafic, trajectoires, dynamique véhicule). Nous avons essayé de représenter, Fig. 7.1, notre contribution au développement de l'UMR à partir de la thématique **Vision**. Nos contributions aux autres thématiques, à partir de la vision, portent principalement sur la réalité virtuelle (amélioration et évaluation des images pour la simulation de conduite), mais également sur la mobilité (modèle de perception pour la simulation de trafic microscopique). En retour, la simulation de conduite comme l'observation du trafic constituent des moyens de validation des travaux sur la perception en conduite qu'il conviendrait de mieux utiliser. On peut observer que nos travaux contribuent également à la cohérence de l'ensemble, en créant des liens entre les trois thématiques.



FIG. 7.1 – Organisation scientifique du LEPSiS, et interactions entre nos recherches en vision et les deux autres thématiques : réalité virtuelle et mobilité.

Plus globalement, nous proposons d'aborder explicitement les missions du LEPSiS à travers l'approche *complexe* dont nous avons vu la pertinence autour de la thématique de la perception. Il nous semble en effet que le domaine de la mobilité comme celui de la réalité virtuelle sont par nature inter-disciplinaires, et que les points forts sur lesquels le Laboratoire peut s'appuyer est la complémentarité entre une expertise technique reconnue dans des domaines précis (développement de simulateurs de conduite, simulation de trafic microscopique, photométrie, traitement d'images, etc.) et la capacité, déjà démontrée dans plusieurs domaines, à faire coopérer plusieurs disciplines académiques. Outre nos contributions, les travaux de N. Hautière sur le calcul de la visibilité par traitement d'images, de J.-P. Tarel sur le calcul de la saillance visuelle par traitement d'images, de S. Espié sur la simulation de trafic routier à partir de modèles psychologiques, de J.-M. Auberlet sur les interactions piétons/automobilistes vont dans ce sens.

La création prochaine du département « Infrastructures et systèmes de transport⁴ » au LCPC, sous la direction de P. Tamagny, devrait permettre d'élargir les collaborations entre le LEPSiS et le LIVIC sur la simulation de capteurs (travail engagé dans le projet eMotive), sur les images de pluie, ainsi que sur le calcul de la visibilité par traitement d'images. Parallèlement, on peut espérer que des collaborations avec la section « Acoustique Routière et Urbaine » du futur département enrichissent notre approche de la perception en conduite, ainsi que les modèles de bruit routier utilisés sur simulateur de conduite.

Enfin on peut observer que la fusion programmée des deux EPST du MEEDDM en charge des recherches sur les transports et leurs infrastructures, le LCPC et l'INRETS, encourage l'approche pluri-disciplinaire et le mélange des cultures scientifiques que nous soutenons dans nos travaux.

Aknowledgement

Merci à Marc Abouaf, Julien Andoche, Jean-Michel Auberlet, Raouf Barbari, Christian Bastien, Alexandre Berlinski, René Bertin, Katel Botrell, Hans Brettel, Valérie Boulanger, Clotilde Boust, Patrick Brézillon, Victor Carta, Jean-Philippe Caruana, Viola Cavallo, Hicham Choukour, Emmanuel da Costa, Corinne Dathy, Lara Désiré, Marion Deugnier (puis Maestracci), Minh-Tan Do, Eric Dumont, Stéphane Espié, Charlène Floch, Pascal Fournier, Gilles Gallée, Romain Gallen, Patrick Gateau, Irini Giannopulu, Yann Goyat, Marie-Axelle Granié, Justine Grave, Emmanuelle Grislin-Le Strugeon, Donald Greenhouse, Nicolas Hautière, Christian His, Xavier Janc, Dominique Jeulin, Zoé Kapoula, Karl Kristianson, Stéphane Lay, Vincent Ledoux, Vincent

⁴Le nom exact du département n'était pas définitivement arrêté lors de l'écriture de ces lignes.

Lux, Ferran Marqués, Anaïs Mayeur, Régis Mollard, Benoit Mordelet, Henri Panjo, Nicolas Paparoditis, Giselle Paulmier, Josselin Petit, Gilles Pouliquen, Romain Rabier, Gaëtan Serpe, Ludovic Simon, Alain Somat, Jean-Philippe Tarel, Ariane Tom, Vincent Tron, Fabrice Vienne, et Françoise Viénot pour leur contribution à ces travaux de recherche. Merci également à Corinne Brusque, Michel Bry, Jean Peybernard et Jean Serra et pour leur soutien efficace.

Bibliographie

A. Contributions

- [AB08] Jean-Michel Auberlet and Roland Brémond. Mieux percevoir autrui en anticipant ses intentions. Le cas de la locomotion. In *Actes des Journées Francophones des Systèmes Multi-Agent*, pages 43–51, Brest, Octobre 2008. Cepadues.
- [ABD⁺10] Jean-Michel Auberlet, Roland Brémond, Lara Désiré, Marie-Axelle Granié, Marion Maestracci, Romain Rabier, and Ariane Tom. The pedestrian at the center of planning : no evaluation without data. In *International Conference on Safety and Mobility of Vulnerable Road Users*, Jerusalem, juin 2010. (to appear).
- [And04] Julien Andoche. Development of a tone mapping operator. Rapport de stage ingénieur, ENSIMAG, (dir. LCPC R. Brémond), 2004.
- [BB99a] Valérie Boulanger and Roland Brémond. Photometrically realistic texture simulations in urban and traffic applications. In *Actes du congrès Driving Simulation Conference*, pages 181–194, Paris, 1999. INRETS/Renault.
- [BB99b] Corinne Brusque and Roland Brémond. Modélisation et simulation d'éclairage extérieur par synthèse d'images. *CSTB magazine*, 123, mai-juin 1999.
- [BC02] Roland Brémond and Victor Carta. Local de validation et d'essai pour les images de synthèse. Rapport interne, LCPC, 2002.
- [BCDG07] Roland Brémond, Hicham Choukour, Eric Dumont, and Yannick Guillard. A night-time road visibility index for the diagnosis of rural road networks. In *Actes de la 26ème session de la CIE*, volume 2 (D4), pages 104–109 (1C–P15), Pékin (Chine), juillet 2007. CIE.
- [BCDG09] Roland Brémond, Karl B. Christianson, Eric Dumont, and David S. Greenhouse. Methods to monitor nighttime visibility and headlight glare on the road. 19th biennial TRB Visibility Symposium, 2009. (oral presentation).
- [BD01] Roland Brémond and Eric Dumont. Positionnement sur la simulation de conduite. Note de synthèse à la Direction Scientifique, LCPC, 2001.
- [BD02] Roland Brémond and Eric Dumont. Simulation de conduite nocturne. Rapport à la Direction des Routes du Ministère de l'Équipement, LCPC, 2002.
- [BD03b] Roland Brémond and Eric Dumont. Respect des performances visuelles lors de la visualisation d'images de synthèse. In *Actes*

des Journées de Sciences de l'Ingénieur, pages 581–586, Dourdan, 2003. LCPC.

- [BD06] Roland Brémond and Marion Deugnier. Saliency of road signs in urban areas. In A. Gale, editor, *Proc. 11th Int. Conf. Vision in Vehicles*, Dublin (Irlande), juillet 2006. in press [!].
- [BDLM] Roland Brémond, Eric Dumont, Vincent Ledoux, and Anaïs Mayeur. Road visibility : from photometric measurements to driving performances. *Lighting Research and Technology*. (soumis).
- [BEC07] Roland Brémond, Stéphane Espié, and Viola Cavallo, editors. *La simulation pour les recherches sur la lisibilité de la route*, volume CR 44. Coll. Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, LCPC, 2007.
- [BG01] Roland Brémond and Gilles Gallée. Realistic lighting rendering for driving simulation. In *Actes du congrès Driving Simulation Conference*, Nice, 2001. INRETS/Renault.
- [BG02] Roland Brémond and Gilles Gallée. Image quality for driving simulation experiments. In *Actes du congrès Virtual Reality International Conference*, Laval, 2002.
- [BG07] Roland Brémond and Justine Grave. Experimental comparison of tone mapping operators using a visual performance index. In *Actes de la 26ème session de la CIE*, volume 2 (D8), pages 6–9 (1C–P2), Pékin (Chine), juillet 2007. CIE.
- [BHD⁺10] Raouf Barbari, Nicolas Hautière, Eric Dumont, Roland Brémond, and Nicolas Papanoditis. Estimating meteorological visibility using outdoor cameras : a model-driven approach. In *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, Héraklion (Grèce), septembre 2010. (submitted).
- [BJ94a] Roland Brémond and Dominique Jeulin. Génération d'agrégats aléatoires par gaz sur réseau. 17^e réunion annuelle de la section française de la société internationale pour la stéréologie (ISS), Paris, 1994. (Présentation orale).
- [BJ94b] Roland Brémond and Dominique Jeulin. Morphogenesis simulations with lattice gas. In *Proceedings of Mathematical Morphology and its applications to Image Processing*, pages 297–304, Fontainebleau, Août 1994. Kluwer Press.
- [BJ94c] Roland Brémond and Dominique Jeulin. Random media and lattice gas simulations. In *Actes du workshop Geostatistical Simulation 1993*, pages 89–105, Fontainebleau, Février 1994. Kluwer Press.

- [BJAH95] Roland Brémond, Dominique Jeulin, Marc Abouaf, and Christian His. Simulation of the filtration of cast-iron. *Revue de Métallurgie et Matériaux*, 92(5) :593–606, Mai 1995.
- [BJAH97] Roland Brémond, Dominique Jeulin, Marc Abouaf, and Christian His. Modelling the filtration of cast-iron by lattice-gas. In *Advanced Materials Research, Proceedings of the 5th International Symposium on the Physical Metallurgy of Cast Iron*, volume 4-5, pages 521–528, Nancy, octobre 1997. Scitec Publications.
- [BJDA92] Roland Brémond, Dominique Jeulin, Corinne Dathy, and Marc Abouaf. Simulation par gaz sur réseau de la filtration de la fonte. *Mem. Sci. Rev. Métallurgique*, 9 :534, Septembre 1992.
- [BJG⁺94] Roland Brémond, Dominique Jeulin, Patrick Gateau, J. Jarrin, and Gaëtan Serpe. Estimation of the transport properties of polymer composites by geodesic propagation. *Journal of Microscopy*, 176(2) :167–177, novembre 1994.
- [BLP05] Roland Brémond, Vincent Ledoux, and Giselle Paulmier. Psychometric assessment of possible legibility impairment with microprismatic retroreflective material used for road signs. 17th biennial TRB symposium on visibility and trafic control device, Washington DC (USA), 2005. (présentation orale).
- [BM96] Roland Brémond and Ferran Marqués. Segmentation-based interpolation of image sequences using mathematical morphology. In *Proceedings of Mathematical Morphology and its Applications to Image and Signal Processing*, pages 369–376, Atlanta (USA), Mai 1996. Kluwer Academic Press.
- [Bou00] Valérie Boulanger. *Prise en compte des textures photométriquement et colorimétriquement réalistes dans les simulations d'éclairage*. PhD thesis, ENST (dir. H. Brettel), Paris, 2000.
- [Bré90] Roland Brémond. Architecture distribuée adaptée à la régulation et à la recherche d'une mémoire de groupe. Mémoire de DEA Intelligence Artificielle, Reconnaissance des Formes et Algorithmique Graphique (IARFAG), 1990.
- [Bré93] Roland Brémond. *Modélisation de la filtration par gaz sur réseau*. PhD thesis, Ecole des Mines de Paris (dir. D. Jeulin), Fontainebleau, octobre 1993. Mention très honorable, félicitations du jury.
- [Bré95] Roland Brémond. Image interpolation based on mathematical morphology. Human capital and mobility report, Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelone (Espagne), 1995.
- [Bré97] Roland Brémond. Définition d'une texture réaliste pour les calculs d'éclairage. In *Actes du congrès de l'Association Française d'Informatique Graphique*, pages 31–40, Rennes, 1997. IRISA.

- [Bré00a] Roland Brémond. Documentation technique du logiciel LiseLCPC 2.0. Rapport interne, LCPC, 2000.
- [Bré01] Roland Brémond. L'éclairage urbain au LCPC. Note de synthèse à la Direction Scientifique, LCPC, 2001.
- [Bré02a] Roland Brémond. Documentation technique du logiciel LiseLCPC-BRDF. Rapport interne, LCPC, 2002.
- [Bré02b] Roland Brémond. Les calculs d'éclairage pour la simulation de conduite. Journées du CUISS, Paris, 2002. (Présentation orale).
- [Bré02c] Roland Brémond. Respect des niveaux de visibilité dans les images de synthèse. In *Actes du congrès de l'Association Française d'Informatique Graphique*, pages 221–230, Lyon, 2002. LI-RIS.
- [Bré02d] Roland Brémond. Simulation d'éclairage de scènes routières et urbaines. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 242 :77–91, 2002.
- [Bré03a] Roland Brémond. Rapport final de la convention de recherche LCPC-Oktal. Rapport interne, LCPC, 2003.
- [Bré03b] Roland Brémond. Recherches sur la perception visuelle dans les espaces publics : enjeux pour le LCPC et le Réseau des CETE. Rapport interne, LCPC, 2003.
- [Bré03c] Roland Brémond, editor. *Recherches sur les spécificités urbaines de la perception visuelle la nuit*, volume EG17. Coll. Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, LCPC, 2003.
- [Bré04] Roland Brémond. Aménagements urbains et sécurité routière, enjeux de la visibilité et de la lisibilité de la voirie urbaine. Rapport interne, LCPC, 2004.
- [Bré05] Roland Brémond. Calcul d'éclairage pour la réalité virtuelle. Journée INRETS simulation de conduite, Bron, 2005. (Présentation orale).
- [Bré06a] Roland Brémond. Apport de la psychologie à l'étude des trajectoires routières : l'exemple de J. J. Gibson. Séminaire *Trajectoires* du LCPC, Nantes, 2006. (Présentation orale).
- [Bré06b] Roland Brémond. La psychologie ergonomique et ses applications pour la recherche en sécurité routière. Séminaire LCPC, Paris, 2006. (Présentation orale).
- [Bré06c] Roland Brémond. Road lighting performance : criteria, measurement and simulation. Séminaire de clôture du projet européen CLARESCO (PCRD), Guyancourt, 2006. (Présentation orale).

- [Bré06d] Roland Brémond. Vocabulaire de la visibilité routière. Livrable 1.1.1 du projet PREDIT VIZIR, LCPC, 2006.
- [Bré07a] Roland Brémond. L'éclairage public : éclairage des piétons, éclairage pour les piétons. Séminaire INRETS de la PFI COPIE, Arcueil, 2007. (Présentation orale).
- [Bré07b] Roland Brémond. Les images de synthèse pour la simulation de conduite. Journée INRETS simulation de conduite, Bron, 2007. (Présentation orale).
- [Bré07c] Roland Brémond. Quality indexes for road lighting : a review. In *Actes de la 26ème session de la CIE*, volume 2 (D4), pages 100–103 (PO-414), Pékin (Chine), juillet 2007. CIE.
- [Bré07d] Roland Brémond. Rapport final, tranche 1. Livrable 5.1.1 du projet PREDIT VIZIR, LCPC, 2007.
- [Bré07e] Roland Brémond. *Vocabulaire de la visibilité routière*. Cf. perso.lcpc.fr/roland.bremond/vulgarisation, 2007.
- [Bré08a] Roland Brémond. Effet de la démarche qualité dans l'entreprise sur la légitimation du harcèlement moral. Projet tutoré de psychologie sociale (L3), Université Paris VIII, 2008.
- [Bré08b] Roland Brémond. L'Accueil Enfants-Parents de Villeneuve-la-Garenne. Rapport de stage de psychologie clinique (L3, dir. A. Berlinski), Université Paris VIII, 2008.
- [Bré08c] Roland Brémond. L'évolution des représentations au cours du développement : l'exemple de la couleur des objets dans le dessin d'enfant. Projet tutoré de psychologie du développement (L3), Université Paris VIII, 2008.
- [Bré08d] Roland Brémond. Rapport final, tranche 2. Livrable 5.1.2 du projet PREDIT VIZIR, LCPC, 2008.
- [Bré09] Roland Brémond. Rapport final, tranche 3. Livrable 5.1.3 du projet PREDIT VIZIR, LCPC, 2009.
- [BTCD06] Roland Brémond, Jean-Philippe Tarel, Hicham Choukour, and Marion Deugnier. La saillance visuelle des objets routiers, un indicateur de la visibilité routière. In *Actes des Journées des Sciences de l'Ingénieur*, Marne la Vallée, 2006. LCPC.
- [BTDH] Roland Brémond, Jean-Philippe Tarel, Eric Dumont, and Nicolas Hautière. Vision models for image quality assessment : one is not enough. *Journal of Electronic Imaging*. (révision majeure).
- [Car02] Jean-Philippe Caruana. Mise en place d'une base de données de mesures photométriques. Rapport de stage 3^e année, Ecole des Mines d'Albi, (dir. LCPC R. Brémond et V. Ledoux), 2002.

- [CBD07] Hicham Choukour, Roland Brémond, and Eric Dumont. Méthode de mesure de la visibilité nocturne. Livrable 1.2.2 du projet PREDIT VIZIR, LCPC, 2007.
- [DBB⁺03] Eric Dumont, Roland Brémond, Clotilde Boust, Emmanuel da Costa, and Françoise Viénot. Assessment of the visual quality of images for visibility experiments : psychometric evaluation of tone mapping algorithms. In *Actes du congrès de la CIE*, volume 2, pages D4 82–85, San Diego (USA), 2003.
- [DBH08] Eric Dumont, Roland Brémond, and Nicolas Hautière. Night-time visibility as a function of headlamps beam pattern and pavement reflexion properties. In *Actes du Congrès VISION 2008*, Satory, octobre 2008. SIA. (CD-ROM).
- [Deu05] Marion Deugnier. Ergonomie visuelle de la route. Rapport de stage master pro, spécialité ergonomie, université Paris V, UFR Biomédicale, (dir. LCPC R. Brémond), 2005.
- [FABB08] Charlène Floch, Jean-Michel Auberlet, Roland Brémond, and Patrick Brézillon. Modélisation de la représentation de l’environnement dans les systèmes multi-agents. application au contexte du trafic routier. forum NTIC « SMA et transports », Marne la Vallée, 2008. (poster).
- [Gal05] Romain Gallen. Influence de la pluie sur la vision en situation de conduite. Rapport de master pro imagerie industrielle, Université Paris VI, (dir. LCPC R. Brémond), 2005.
- [GB05a] Justine Grave and Roland Brémond. Conception et évaluation d’un opérateur de *tone mapping* pour des études de visibilité routière. In *Actes du congrès de l’Association Française d’Informatique Graphique*, pages 22–31, Strasbourg, 2005. ULP.
- [GB05b] Justine Grave and Roland Brémond. Designing a tone mapping algorithm for road visibility experiments. In *APGV '05 : Proceedings of the 2nd symposium on Applied perception in graphics and visualization*, page 168, La Corogne (Espagne), 2005. ACM Press. (poster abstract).
- [GB06] Justine Grave and Roland Brémond. An optimized display algorithm for night time images. In *Actes du congrès IASTED VIII*, Palma de Mallorca (Espagne), 2006. IASTED.
- [GB08] Justine Grave and Roland Brémond. A tone mapping algorithm for road visibility experiments. *ACM Transaction on applied perception*, 5(2) :article 12, 2008.
- [GBB⁺07] Irini Giannopulu, René Bertin, Roland Brémond, Zoé Kapoula, and Stéphane Espié. Visual strategies using driving simulators in virtual and pre-recorded environments. In *Proc. of the RSS international Conference*, Roma (Italie), novembre 2007.

- [GBB⁺08] Irimi Giannopulu, René Bertin, Roland Brémond, Stéphane Espié, and Zoé Kapoula. Visuomotor strategies using driving simulators in virtual and pre-recorded environment. *Advances in Transportation Studies*, 14 :49–56, 2008.
- [GGD⁺07a] Marie-Line Gallenne, Yann Goyat, Minh-Tan Do, Roland Brémond, Katell Botrell, and Alain Sommat. SARI : comment informer plus efficacement les conducteurs d’un risque de perte de contrôle de leur véhicule. In *Actes du congrès ATEC-ITS France*, Paris, janvier 2007. ATEC.
- [GGD⁺07b] Marie-Line Gallenne, Yann Goyat, Minh-Tan Do, Roland Brémond, Katell Botrell, and Alain Sommat. SARI : How to inform drivers and road managers more efficiently about high level risk of vehicle loss of control. In *Actes du ITS World Congress*, Pékin, octobre 2007.
- [GGD⁺08] Marie-Line Gallenne, Yann Goyat, Minh-Tan Do, Roland Brémond, Katell Botrell, and Pascal Fournier. SARI : automatic road condition monitoring to provide information to drivers and road managers. Tools for diagnosis. In *Actes du ITS World Congress*, New York (USA), novembre 2008.
- [Gra06] Justine Grave. *Conception et évaluation d’un opérateur de reproduction de tons pour des études de visibilité routière*. PhD thesis, Université Lyon I (dir. B. Péroche), Lyon, 2006.
- [HDB⁺09] Nicolas Hautière, Eric Dumont, Roland Brémond, Didier Aubert, and Jean-Philippe Tarel. Estimation d’un indicateur de visibilité. Livrable 2.C.1 du projet ANR DIVAS, LCPC, 2009.
- [HDBL09a] Nicolas Hautière, Eric Dumont, Roland Brémond, and Vincent Ledoux. Review of the mechanisms of visibility reduction by rain and wet road. In *Proc. of the International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, pages 445–455, Darmstadt (Allemagne), Septembre 2009.
- [HDBL09b] Nicolas Hautière, Eric Dumont, Roland Brémond, and Vincent Ledoux. Mécanismes de réduction de la visibilité par la pluie et les projections d’eau. Livrable 2.C.2 du projet ANR DIVAS, LCPC, 2009.
- [HTB07] Nicolas Hautière, Jean-Philippe Tarel, and Roland Brémond. Perceptual hysteresis thresholding : towards driver visibility descriptors. In *Proc. IEEE international conference on Intelligent Computer Communication and Processing*, Cluj Napoca (Roumanie), Septembre 2007.
- [Jan01] Xavier Janc. La pollution lumineuse ou les enjeux de formes de nuisances émergentes. Rapport de mastère de management

- public et maîtrise technique, ENPC, (dir. LCPC R. Brémond), 2001.
- [KABS10] Utku Ketenci, Jean-Michel Auberlet, Roland Brémond, and Emmanuelle Grislin-Le Strugeon. Impact of attentional factors in a multi-agent traffic simulation. In *Computer Animation and Social Agents (CASA)*, St Malo, juin 2010. (poster abstract).
- [Lay97] Stéphane Lay. Représentation des textures pour des calculs d'éclairage. Rapport de DEA informatique fondamentale et applications, Université de Marne la Vallée, (dir. LCPC R. Brémond), 1997.
- [LCP07] LCPC. Lumière sur la visibilité routière. plaquette de présentation pour la fête de la science (conception : Corporate Fiction, collaboration A. Mayeur, R. Brémond et F. Mailliet), 2007.
- [Lux01] Vincent Lux. Intégration de calculs d'éclairage photométriquement réalistes dans des bases de données temps réel. Rapport de DESS informatique multimédia, Université de Bordeaux, (dir. LCPC R. Brémond), 2001.
- [May09] Anaïs Mayeur. *Effet de facteurs contextuels et liés à l'activité de conduite sur la détection de cible. Implications pour la conception de l'éclairage routier*. PhD thesis, Université Paris Descartes (dir. R. Mollard), Paris, 2009.
- [MB10] Anaïs Mayeur and Roland Brémond. Vers la prise en compte du contexte et de l'activité de conduite en conception de l'éclairage routier. *Lux (cahiers techniques)*, 259, sept.-oct. 2010. (to appear).
- [MBB08a] Anaïs Mayeur, Roland Brémond, and Christian Bastien. Effects of task and eccentricity of the target on detection thresholds in mesopic vision. Implication for road lighting. *Human Factors*, 4(50) :712–721, août 2008.
- [MBB08b] Anaïs Mayeur, Roland Brémond, and Christian Bastien. La conception de l'éclairage public : de la psychophysique à l'ergonomie. In P. Negroni and Y Haradji, editors, *Actes du 33e congrès de la SELF*, pages 353–360, Ajaccio, Septembre 2008.
- [MBB08c] Anaïs Mayeur, Roland Brémond, and Christian Bastien. Vers l'étude de l'influence de la tâche de conduite sur les modèles de dimensionnement de l'éclairage : une première approche. In *Proc. congrès ERGO-IA*, Biarritz, Octobre 2008.
- [MBB10a] Anaïs Mayeur, Roland Brémond, and Christian Bastien. The effect of the driving activity on target detection as a function of the visibility level. *Transportation Research, part F : traffic psychology and behavior*, 13 :115–128, 2010.

- [MBB10b] Anaïs Mayeur, Roland Brémond, and Christian Bastien. Effects of the viewing context on peripheral target detection. Implications for road lighting design. *Applied Ergonomics*, 41 :461–468, 2010.
- [Mor00] Benoit Mordelet. Mise en place d’une chaîne logicielle de production de textures de luminance. Rapport de DEA image, Université de Saint-Etienne, (dir. LCPC R. Brémond), 2000.
- [PB09] Josselin Petit and Roland Brémond. Interactive high dynamic range rendering for virtual reality applications. In *VRST ’09 : Proceedings of the 16th Symposium on Virtual Reality and Software Technology*, pages 251–252, Kyoto (Japon), Novembre 2009. ACM. (poster abstract).
- [PB10b] Josselin Petit and Roland Brémond. A high dynamic range rendering pipeline for interactive applications. In search for perceptual realism. *The Visual Computer, special Issue CGI 2010*, 2010. (to appear).
- [PBT08] Josselin Petit, Roland Brémond, and Jean-Philippe Tarel. Une carte de saillance adaptée aux images HDR. In *Actes du congrès de l’Association Française d’Informatique Graphique*, pages 95–103, Toulouse, 2008.
- [PBT09a] Josselin Petit, Roland Brémond, and Jean-Philippe Tarel. Une carte de saillance adaptée aux images HDR. *Revue Française d’Informatique Graphique*, 3(2) :1–10, 2009.
- [PBT09b] Josselin Petit, Roland Brémond, and Jean-Philippe Tarel. Using tone mapping operators to compute saliency maps for high dynamic range images. In *APGV ’09 : Proceedings of the 6th symposium on Applied perception in graphics and visualization*, page 134. ACM, 2009. (poster abstract).
- [PBV09] Josselin Petit, Roland Brémond, and Fabrice Vienne. High dynamic range rendering for driving simulations. In *Proc. of Road Safety and Simulation Conference*. INRETS-LCPC, novembre 2009. (CD-ROM).
- [PDPB09] Giselle Paulmier, Eric Dumont, Henri Panjo, and Roland Brémond. Evaluation du niveau d’adaptation visuel en présence d’hétérogénéités spatiales. Rapport interne, LCPC, 2009.
- [Pou99] Gilles Pouliquen. Respect des niveaux de visibilité dans la restitution d’images de synthèse. Rapport de DEA/TFE, ENSMSE et Université de Saint-Etienne, (dir. LCPC R. Brémond), 1999.
- [RBA09] Romain Rabier, Roland Brémond, and Jean-Michel Auberlet. Un système de prise de vue panoramique bas-coût pour la réa-

- lité virtuelle. In *Actes du congrès de l'Association Française d'Informatique Graphique*, pages 205–212, Arles, novembre 2009.
- [STB07] Ludovic Simon, Jean-Philippe Tarel, and Roland Brémond. A new paradigm for the computation of conspicuity of traffic signs in road images. In *Actes de la 26ème session de la CIE*, volume 2 (D4), pages 38–41 (1C–P14), Pékin (Chine), juillet 2007. CIE.
- [STB08] Ludovic Simon, Jean-Philippe Tarel, and Roland Brémond. Towards the estimation of conspicuity with visual priors. In *Proc. VISAPP*, volume 2, pages 323–328, Madère (Portugal), Janvier 2008.
- [STB09] Ludovic Simon, Jean-Philippe Tarel, and Roland Brémond. Alerting the drivers about road signs with poor visual saliency. In *Proc. Intelligent Vehicles Symposium*, pages 48–53, Xi'an (Chine), Juin 2009. IEEE.
- [STB10a] Ludovic Simon, Jean-Philippe Tarel, and Roland Brémond. Automatic diagnostic of road signs saliency. In *Transportation Research Arena*, Bruxelles (Belgique), juin 2010. (to appear).
- [STB10b] Ludovic Simon, Jean-Philippe Tarel, and Roland Brémond. Estimation de la saillance visuelle. In P. Foucher, editor, *Détection et Reconnaissance de la signalisation verticale par analyse d'images*. Coll. Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, LCPC, 2010. (to appear).
- [STPB09a] Ludovic Simon, Jean-Philippe Tarel, Henri Panjo, and Roland Brémond. A computational model of visual search saliency for road signs diagnostic. *Perception*, 38 (supplement) :46, 2009. (abstract of ECVP 2009).
- [STPB09b] Ludovic Simon, Jean-Philippe Tarel, Henri Panjo, and Roland Brémond. A computational model of visual search saliency for road signs diagnostic. European Conference on Visual Perception, Août 2009. (Présentation orale).
- [TAB07a] Ariane Tom, Jean-Michel Auberlet, and Roland Brémond. Approche psychologique de l'activité de traversée de piétons au carrefour. In *Actes n° 115 (Colloque COPIE)*, pages 95–105, Paris, novembre 2007. INRETS.
- [TAB07b] Ariane Tom, Jean-Michel Auberlet, and Roland Brémond. Perceptive and cognitive processes in the pedestrian decision making : how do pedestrians cross at intersections? In *Proc. ICTCT extra workshop*, pages 44–54, Pékin, session 1, 2007.
- [TAB08] Ariane Tom, Jean-Michel Auberlet, and Roland Brémond. Approche psychologique de l'activité de traversée de piétons.

- Implications pour la simulation. *Recherche Transports Sécurité*, 101 :265–279, 2008.
- [Tro02] Vincent Tron. Prise en compte de textures et matériaux dans une chaîne de calcul de maquettes virtuelles. Rapport de DESS informatique multimédia, Université de Bordeaux, (dir. LCPC R. Brémond), 2002.
- [VBBD02] Françoise Viénot, Clotilde Boust, Roland Brémond, and Eric Dumont. Rating tone mapping algorithms for gradations. In *Proc. European Conference on Color in Graphics, Image and Vision*, Poitiers, 2002. IS&T.
- [VBdC⁺02] Françoise Viénot, Clotilde Boust, Emmanuel da Costa, Roland Brémond, and Eric Dumont. Psychometric assessment of the look and feel of digital images. In *Actes du congrès Driving Simulator Conference*, pages 301–311, Paris, 2002. INRETS/Renault.

B. Références citées

- [Adr87] Werner Adrian. Visibility level under night-time driving conditions. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 16(2) :3–12, 1987.
- [Adr89] Werner Adrian. Visibility of targets : model for calculation. *Lighting Research and Technology*, 21(4) :181–188, 1989.
- [AFE02] AFE. *Recommandations pour l'éclairage des routes et des rues*. Association Française de l'Éclairage, Lux editions, Paris, 2002.
- [AIP08] AIPCR. Guide facteurs humains pour des infrastructures routières plus sûres. Comité technique AIPCR C.1, 2008.
- [ALA71] T. M. Allen, H. Lunenfeld, and G. J. Alexander. Driver information needs. *Highway Research Board*, 36 :102–115, 1971.
- [Ama01] René Amalberti. *Bases de la psychologie ergonomique*. Université Paris VIII / CNED, Paris, 2001.
- [ARB07] Yukio Akashi, M. S. Rea, and J. D. Bullough. Driver decision making in response to peripheral moving targets under mesopic light levels. *Lighting Research and Technology*, 39(1) :53–67, 2007.
- [BA83] Peter J. Burt and Edward H. Adelson. The Laplacian pyramid as a compact image code. *IEEE Transactions on Communications*, 31(4) :532–540, 1983.
- [BCNL92] Corinne Brusque, Victor Carta, Vuong Nguyen, and Jérôme Louage. Qualification de LISE comme outil de simulation de la propagation de la lumière. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, pages 3–16, Septembre 1992.
- [BD03] Alain Berthoz and Philippe Descola. *Stratégies cognitives d'orientation spatiale*, 2003. Séminaire au Collège de France, Paris.
- [Ber65] Claude Bernard. *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*. Garnier-Flammarion (édition de 1966), Paris, 1865.
- [Ber02] Alain Berthoz. *Perception et émotion*, 2002. Cours au Collège de France, Paris.
- [Ber03] Alain Berthoz. *La Décision*. Odile Jacob, Paris, 2003.
- [Ber04] Alain Berthoz. *Regard, attention, intention*, 2004. Cours au Collège de France, Paris.
- [BGF08] Vincent Boucher, Florian Greffier, and Fabrice Fournela. High speed acquisition system of photo-colorimetric images to record and to model human visual signal. In *Proc. SPIE Optics and Photonics*, San Diego, CA, Août 2008. SPIE.

- [BH01] Alexis Bacelar and Michel Hamard. Contribution of headlights in public lighting. In *Proc. Lux Europa*, 2001.
- [Bla46] H. Richard Blackwell. Contrast threshold of the human eye. *Journal of the Optical Society of America*, 36(11) :624–643, 1946.
- [BMF⁺81] Vivek K. Bhise, James F. Meldrum, Liman M. Forbes, Thomas H. Rockwell, and Edward D. McDowell. Predicting driver seeing distance in natural rainfall. *Human Factors*, 23(6) :667–682, 1981.
- [BMM⁺97] Corinne Brusque, Jean Ménard, Marie-Claude Montel, Danièle Dubois, and Philippe Resche-Rigon. Etude des processus de catégorisation de la voirie urbaine par les usagers en conditions diurne et nocturne. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 207 :45–54, 1997.
- [BNCL91] Corinne Brusque, Vuong Nguyen, Bernard Charlot, and Jérôme Louage. LISE, la synthèse d’image au service de l’éclairage. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, pages 25–38, Juillet-Août 1991.
- [BNR03] Thierry Brenac, Claudine Nachtergaële, and Hélène Reigner. Scénarios types d’accidents impliquant des piétons et éléments pour leur prévention. Technical Report 256, INRETS, 2003.
- [Bou97] Pierre Bourdieu. *Les usages sociaux de la science : pour une sociologie clinique du champ scientifique*. INRA, Paris, 1997.
- [Bou01] Pierre Bourdieu. Science de la science et réflexivité, 2001. Cours au Collège de France, Paris.
- [BT86] Wout J. M. Van Bommel and J. Tekelenburg. Visibility research for road lighting based on a dynamic situation. *Lighting Research and Technology*, 18(1) :37–39, 1986.
- [BT07] Erwan Bigorgne and Jean-Philippe Tarel. Backward segmentation and region fitting for geometrical visibility range estimation. In *Proc. of Asian Conference on Computer Vision*, volume II, pages 817–826, Tokyo, Japan, 2007.
- [BTV99] Thierry Bellet and Hélène Tattegrain-Veste. A framework for representing driving knowledge. *International journal of cognitive ergonomics*, 3(1) :37–49, 1999.
- [CB01] Viola Cavallo and Catherine Berthelon, editors. *Facteurs perceptifs dans les activités de transport. Actes du colloque du 23/1/2001*, 82. INRETS, 2001.
- [CER94] CERTU. *Ville plus sûre, quartiers sans accidents*. CERTU, Lyon, 1994.

- [CER00] CERF. Evaluation findings of the Ecodyn mobile pavement marking retro-reflectometer. Technical Report 40470-2000, Civil Engineering Research Foundation, 2000.
- [Cha97] Jean-Pierre Changeux. *Formes et couleurs, fondements neuro-culturels*, 1997. Séminaire au Collège de France, Paris.
- [CIE81] CIE. An analytic model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance, Vol. 1 : Technical foundations. Technical report, CIE 19.2/1, 1981.
- [CIE92a] CIE. Contrast and visibility. Technical report, CIE 95, 1992.
- [CIE92b] CIE. Fundamentals of the visual task of night driving. Technical report, CIE 100, 1992.
- [CIE93] CIE. Road lighting as an accident countermeasure. Technical report, CIE 93, 1993.
- [CIE95] CIE. Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic. Technical report, CIE 115, 1995.
- [CIE96] CIE. The relationship between digital and colorimetric data for computer-controlled CRT displays. Technical report, CIE 122, 1996.
- [CIE97] CIE. Guidelines for minimizing sky glow. Technical report, CIE 126, 1997.
- [CIE00a] CIE. The conspicuity of traffic signs in complex backgrounds. Technical report, CIE 137, 2000.
- [CIE00b] CIE. Guide to the lighting of urban areas. Technical report, CIE 136, 2000.
- [CIE02] CIE. CIE equations for disability glare. Technical report, CIE 146, 2002.
- [CR68] F. W. Campbell and J. G. Robson. Application of fourier analysis to the visibility of gratings. *Journal of Physiology*, 197 :551–566, 1968.
- [CUC99] David Crundall, Geoffrey Underwood, and Peter Chapman. Driving experience and the functional field of view. *Perception*, 28 :1075–1087, 1999.
- [Dal93] Scott Daly. *The Visible Differences Predictor : An Algorithm for the Assessment of Image Fidelity*, pages 179–206. A. B. Watson Ed., *Digital Images and Human Vision*, MIT Press, Cambridge, MA, 1993.
- [DCWP02] Kate Delvin, Alan Chalmers, Alexander Wilkie, and Werner Purgathofer. Tone reproduction and physically based spectral rendering. In *Eurographics State of the Art Report*, Saarbrucken (Allemagne), 2002.

- [Der87] Rachid Deriche. Using Canny's criteria to derive an optimal edge detector recursively implemented. *International Journal on Computer Vision*, 2(1) :167–187, 1987.
- [Des37] René Descartes. *Discours de la méthode pour bien conduire la raison et chercher la vérité dans les sciences*. Ian Maire, Leyde, 1637.
- [dLDT01] Brigitte Cambon de Lavalette, Jocelyne Doré, and Charles Tijus, editors. *La signalétique : conception, validation, usages. Actes de la journée d'étude du 15/11/1999*, 73. INRETS, 2001.
- [DM97] Paul Debevec and Jitendra Malik. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. In *Proceedings of SIGGRAPH*, pages 369–378. ACM, 1997.
- [DRA02] DRAST. *Gisement de sécurité routière, vol. 1 et 2*. MEEDM, Paris la Défense, 2002.
- [Dum07] Eric Dumont, editor. *Photométrie des chaussées et éclairage public*, volume CR45. Coll. Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, LCPC, 2007.
- [Duv76] Paul-Marie Duval. *Les dieux de la Gaule*. PUF, 2e éd. augmentée, 1976.
- [EN105] EN13201. *European Norm, 13 201 series : Road lighting*. CEN, 2005.
- [End95] Mica R. Endsley. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors*, 37 :32–64, 1995.
- [Esp95] Stéphane Espié. Archisim : multi-actor parallel architecture for traffic simulation. In *Proceedings of the World Congress of Intelligent Transport System*, volume IV, Yokohama (Japon), Novembre 1995.
- [Fai05] Mark D. Fairchild. *Color appearance models, 2d ed.* John Wiley & Sons, 2005.
- [Fer95] Jacques Ferber. *Les systèmes multi-agents*. InterEditions, 1995.
- [Fer03] James A. Ferwerda. Three varieties of realism in computer graphics. In *Proceedings SPIE Human Vision and Electronic Imaging*, pages 290–297, 2003.
- [FHP86] Uriel Frisch, Brosl Hasslacher, and Yves Pomeau. Lattice-gas automata for the navier-stokes equation. *Phys. Rev. Lett.*, 56(14) :1505–1508, Apr 1986.
- [Fir82] D.E. Firth. Pedestrian behavior. In A.J. Chapman, F.M. Wade, and H.C. Foot, editors, *Pedestrian Accidents*, pages 41–69. John Wiley & Sons Ltd, 1982.

- [FPPG96] James A. Ferwerda, Sumanta N. Pattanaik, Shirley Peter., and Donald P. Greenberg. A model of visual adaptation for realistic image synthesis. In *Proceedings of SIGGRAPH*, pages 249–258. ACM, 1996.
- [Gas03] Jean-Pierre Gastaud. Caractéristiques de surface et sécurité routière. note du GNCDS, décembre 2003.
- [GC38] James J. Gibson and L. E. Crooks. A theoretical field-analysis of automobile driving. *The American journal of psychology*, 51(3) :453–471, 1938.
- [Gib79] James J. Gibson. *The ecological approach to visual perception*. Houghton Mifflin, Boston, MA, 1979.
- [Gla89] Andrew S. Glassner. How to derive a spectrum from an RGB triplet. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 9(4) :95–99, 1989.
- [GM75] V. P. Gallagher and P. G. Meguire. Driver visual needs in night driving. Technical Report 156, Transportation Research Board Special Report, 1975.
- [GV05] Dashan Gao and Nuno Vasconcelos. Discriminant saliency for visual recognition from cluttered scenes. In L. K. Saul, Y. Weiss, and L. Bottou, editors, *Advances in Neural Information Processing Systems*, volume 17, pages 481–488. MIT Press, 2005.
- [HA94] Jean-Michel Hoc and René Amalberti. Diagnostic et prise de décision dans les situations dynamiques. *Psychologie Française*, 39 :177–192, 1994.
- [HC07] Firas Hassan and Joan E. Carletta. A real time FGPA-based architecture for a Reinhard-like tone mapping operator. In *Proceedings of Graphics Hardware*, pages 65–72, 2007.
- [HCR93] Roger Hubert, Maurice Canestrelli, and Jean-Pierre Richard. Le laboratoire de photométrie pour les études de visibilité et de la qualité des équipements de la route. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 176 :19–27, 1993.
- [Hil75] Brian L. Hills. Visibility under night driving conditions. Part 2 : Field measurements using disc obstacles and a pedestrian dummy. *Lighting Research and Technology*, 7(4) :251–258, 1975.
- [Hil80] Brian L. Hills. Vision, visibility, and perception in driving. *Perception*, 9 :183–216, 1980.
- [Hoc01] Jean-Michel Hoc. Towards ecological validity of research in cognitive ergonomics. *Theoretical advances in cognitive ergonomics*, 2(3) :278–288, 2001.

- [IDP03] Laurent Itti, N. Dhavale, and F. Pighin. Realistic avatar eye and head animation using a neurobiological model of visual attention. In *Proc. SPIE 48th Annual International Symposium on Optical Science and Technology*, volume 5200, pages 64–78. SPIE Press, 2003.
- [IES00] IESNA. *American National Standard Practice for Roadway Lighting*. RP-8-00, New-York, 2000.
- [IFM05] Piti Irawan, James A. Ferwerda, and Stephen R. Marschner. Perceptually based tone mapping of high dynamic range image streams. In *Proceedings of Eurographics Symposium on Rendering*, pages 231–242, 2005.
- [IK00] Laurent Itti and Christopher Koch. A saliency-based search mechanism for overt and covert shifts of visual attention. *Vision Research*, 40(10-12) :1489–1506, 2000.
- [IK01] Laurent Itti and Christopher Koch. Computational modeling of visual attention. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(3) :194–203, 2001.
- [IKN98] Laurent Itti, Christopher Koch, and Ernst Niebur. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(11) :1254–1259, 1998.
- [IN08] Muhammad M. Ishaque and Robert B. Noland. Behavioural issues in pedestrian speed choice and street crossing behavior : a review. *Transport Review*, 28(1) :61–85, 2008.
- [IRT05] Laurent Itti, Geraint Rees, and John K. Tsotsos, editors. (Ed.) *Neurobiology of attention*. Elsevier, 2005.
- [Itt04a] Laurent Itti. Automatic foveation for video compression using a neurobiological model of visual attention. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(10) :1304–1318, Oct 2004.
- [Knu07] Eric I. Knudsen. Fundamental components of attention. *Annual Review Neuroscience*, 30 :57–78, 2007.
- [KP03] Andras Kemeny and Francisco Panerai. Evaluating perception in driving simulation experiments. *Trends in cognitive sciences*, 7(1) :31–37, 2003.
- [KTH09] A. Kesting, M. Treiber, and D. Helbing. Agents for traffic simulation. In *Multi-Agents systems : Simulations and Applications*, pages 325–356. Taylor and Francis, 2009.
- [KYL⁺07] Jiangtao Kuang, Hiroshi Yamaguchi, Chamgmeng Liu, Garrett M. Johnson, and Mark D. Fairchild. Evaluating HDR rendering algorithms. *ACM Transactions on Applied Perception*, 3(3) :286–308, 2007.

- [Lah33] Jean-Maurice Lahy. Le premier laboratoire psychotechnique ferroviaire français aux chemins de fer du nord. *Le Travail Humain*, 1 :409–431, 1933.
- [Las02] Sylvain Lassarre. Evaluation de l'expérimentation des feux de croisement de jour dans les Landes. Technical Report 244, INRETS, 2002.
- [Lau63] Georges Lautner. Les tontons flingueurs. (*d'après Albert Simonin*), dialogues de Michel Audiard, 1963.
- [LCTS05] Patrick Ledda, Alan Chalmers, Tom Troscianko, and Helge Seetzen. Evaluation of tone mapping operators using a high dynamic range display. In *Proceedings of SIGGRAPH*, pages 640–648. ACM Press, 2005.
- [Lec91] J. Lecocq. Visibility level in outdoor lighting. Adrian model applied to spherical cap targets. In *Proceedings of the 22th Session of the CIE*, volume 1, pages Part 2, 48–51, Melbourne (Australie), 1991.
- [LG56a] Yves Le Grand. *Optique Physiologique, tome 2 : lumière et couleurs (2^e édition)*. Masson, Paris, 1956.
- [LG56b] Yves Le Grand. *Optique Physiologique, tome 3 : l'espace visuel*. Editions de la revue d'optique, Paris, 1956.
- [LKK99] Pascal Lecocq, P. Kelada, and Andras Kemeny. Interactive headlight simulation. In *Proc. of the Driving Simulation Conference*, pages 173–180. INRETS/Renault, 1999.
- [LL94] M. F. Land and D. N. Lee. Where we look when we steer. *Nature*, 369 :742–744, Juin 1994.
- [LM03] Martin P. Langham and Nicholas J. Moberly. Pedestrian conspicuity research : A review. *Ergonomics*, 46 :345–363, 2003.
- [LR03] Jacques Lecocq and Christian Remande. Eclairage extérieur, contribution à la formation du halo dans le ciel nocturne. *LUX, la revue de l'éclairage*, 223 :45–49, mai-juin 2003.
- [LS49] Claude Levi-Strauss. *Les structures élémentaires de la parenté*. Presses Universitaires de France, Paris, 1949.
- [Mar82] D. Marr. *Vision*. Freeman, San Francisco (USA), 1982.
- [MCA⁺08] René Mandiau, Alexis Champion, Jean-Michel Auberlet, Stéphane Espié, and Christophe Kolski. Behaviour based on decision matrices for a coordination between agents in a urban traffic simulation. *Applied Intelligence*, 28(2) :121–138, 2008.
- [MD07] Christophe Mundutéguy and Françoise Darses. Perception et anticipation du comportement d'autrui en situation simulée de conduite automobile. *Le Travail Humain*, 70(1) :1–32, 2007.

- [MDMS05] Rafal Mantiuk, Scott Daly, Karol Myszkowski, and Hans-Peter Seidel. Predicting visible differences in high dynamic range images. model and its calibration. In *Proceedings of SPIE Human Vision and Electronic Imaging X*, pages 204–214. SPIE, 2005.
- [MDP⁺07] René Mandiau, Arnaud Doniec, Sylvain Piechowiak, Jean-Michel Auberlet, and Stéphane Espié. Anticiper pour maîtriser la violation de normes : application à la simulation de trafic routier. In *Proc. Journées Francophones des systèmes multi-agent*, pages 87–96, Carcassonne, Octobre 2007. Cepadues.
- [MEE08a] MEEDM. Exposition à des nuisances lumineuses ou sonores. In *Projet de loi portant engagement national sur l’environnement, Titre V, Chapitre 1*, Paris la Défense, 2008. MEEDM.
- [MEE08d] MEEDM. Grenelle de l’environnement, comité opérationnel « Recherche ». MEEDM, Paris la Défense, Juillet 2008.
- [MEE08f] MEEDM. Grenelle de l’environnement, synthèse Groupe 1 « Lutter contre les changements climatiques et maîtriser l’énergie ». MEEDM, Paris la Défense, Juillet 2008.
- [MF07] Marieke H. Martens and Micah Fox. Does road familiarity change eye fixations? A comparaison between watching a video and real driving. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 10(1) :33–47, 2007.
- [MFH⁺02] Nathan Moroney, Mark D. Fairchild, Robert W. G. Hunt, Changjun J. Li, M. Ronnier Luo, and Todd Newman. The CIE-CAM02 color appearance model. In *Proceedings of IS& T-SID 10th color imaging conference*, pages 23–27, 2002.
- [MGP⁺01] Douglas Mace, Philip Garvey, Richard J. Porter, Richard Schwab, and Werner Adrian. Countermeasures for reducing the effects of headlight glare. Technical report, AAA Foundation for Traffic Safety, 2001.
- [MH80] D. Marr and E. Hildreth. Theory of edge detection. In *Proceedings Royal Society London*, pages B–207, 187–217, 1980.
- [ML01] J. Morovic and M. Luo. The fundamentals of gamut mapping : a survey. *Journal of Imaging Science and Technology*, 45(3) :283–290, 2001.
- [MN99] T. Mitsunaga and S. K. Nayar. Radiometric self calibration. In *Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, volume 1, pages 374–380, 1999.
- [Mor86] Edgar Morin. *La méthode, t. III : la connaissance de la connaissance*. Editions du Seuil, Points Essais, 1986.
- [Mor90] Edgar Morin. *Introduction à la pensée complexe*. Editions du Seuil, Points Essais, 1990.

- [Mos00] Sophie Mosser. Méthode d'évaluation de l'influence de la période de la journée et du type de voie sur les attentes des automobilistes en milieu urbain. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 227 :31–39, 2000.
- [Mos07] Sophie Mosser. Eclairage et sécurité en ville : l'état des savoirs. *Déviance et société*, 31(1) :77–100, 2007.
- [MP45] Maurice Merleau-Ponty. *Phénoménologie de la perception*. Gallimard, Paris, 1945.
- [MP04] D. J. Mace and R. J. Porter. Fixed roadway lighting : The effect of lighting geometry and photometry on target visibility and driver comfort. In *83rd Transportation Research Board Annual Meeting*, 2004.
- [MRC+86] G. W. Meyer, H. E. Rushmeier, M. F. Cohen, D. P. Greenberg, and K. E. Torrance. An experimental evaluation of computer graphics imagery. *ACM Transactions on Graphics*, 5(1) :30–50, 1986.
- [Neb74] M. Neboit. Perception, anticipation et conduite automobile. *Le Travail Humain*, 37(1) :53–72, 1974.
- [New99] T. Newman. Image technology. In *Actes de la 24e session de la CIE, Varsovie (Pologne)*, 1999.
- [Pau06] Giselle Paulmier. Caractérisation et étalonnage photométrique et colorimétrique de l'écran lcd nec 1701. Rapport interne, LCPC, 2006.
- [Pau07] Giselle Paulmier. Adaptation du système visuel et vision mésopique. Synthèse bibliographique. Rapport interne, LCPC, 2007.
- [Pel90] Eli Peli. Contrast in complex images. *Journal of the Optical Society of America*, 7(1) :2032–2040, October 1990.
- [Pel95] Eli Peli, editor. *Vision Models for Target Detection and Recognition*. World Scientific Publishing Co., Inc., 1995.
- [PFFG98] Sumanta N. Pattanaik, James A. Ferwerda, Mark D. Fairchild, and Donald P. Greenberg. A multiscale model of adaptation and spatial vision for realistic image display. *Computer Graphics*, 32(Annual Conference Series) :287–298, 1998.
- [Pot00] Anick Pottier. Sources d'information internes et externes à l'habitacle et distribution de l'attention en conduite automobile. Technical Report 231, INRETS, 2000.
- [PTYG00] S. N. Pattanaik, J. Tumblin, H. Yee, and D. P. Greenberg. Time-dependent visual adaptation for fast realistic image display. In *Proceedings of SIGGRAPH*, pages 47–54. ACM Press, 2000.

- [PYG09] E. Papadimitriou, G. Yannis, and J. Golias. A critical assessment of pedestrian behaviour models. *Transportation Research Part F*, 12(3) :242–255, 2009.
- [RABP08] Florence Rosey, Jean-Michel Auberlet, Jean Bertrand, and Patrick Plainchault. Impact of perceptual treatments on lateral control during driving on crest vertical curves : a driving simulator study. *Accident Analysis and Prevention*, 40 :1513–1523, 2008.
- [Ran94] T.A. Ranney. Models of driving behavior : a review of their evolution. *Accident Analysis and Prevention*, 26(6) :733–750, 1994.
- [Ras83] J. Rasmussen. Skills, rules, and knowledge : signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 13(3) :257–266, 1983.
- [RBBC07] A. I. Rupertsberg, M. Bloj, F. Banterle, and A. Chalmers. Displaying colourimetrically calibrated images on a high dynamic range display. *J. Vis. Commun. Image Represent.*, 18(5) :429–438, 2007.
- [Rem03] Christian Remande. Eclairage extérieur et développement durable. *LUX, la revue de l'éclairage*, 223 :41–44, mai-juin 2003.
- [RH37] V. J. Roper and E. A. Howard. Seeing with motor car headlamps. In *Proc. of the 31th Annual Convention of the Illuminating Engineering Society*, White Sulfur Springs, Virginia, 1937.
- [Rod03] R. W. Rodieck. *La vision*. de Boeck, 2003. [*The first steps in seeing*, Sinauer 1998].
- [Rog02] Joceline Rogé. Alteration of the useful visual field as a function of state of vigilance in simulated car driving. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 5(3) :189–200, 2002.
- [Rog03a] Joceline Rogé. Effect of sleep deprivation and driving duration on the useful visual field in younger and older subjects during simulator driving. *Vision Research*, 43(13) :1465–1472, 2003.
- [Rog03b] Joceline Rogé. Influence of age, speed and duration of monotonous driving task in traffic on the driver's useful visual field. *Vision Research*, 44(23) :2737–2744, 2003.
- [RSSF02] Erik Reinhard, M. Stark, Peter Shirley, and James Ferwerda. Photographic tone reproduction for digital images. In *Proceedings of SIGGRAPH*, 2002.

- [RWPD05] Erik Reinhard, Greg Ward, Sumanta N. Pattanaik, and Paul Debevec. *High dynamic range imaging : acquisition, display, and image-based lighting*. Morgan Kaufmann, 2005.
- [Saa96] Farida Saad. Driver strategies in car-following situations. In A. Gale, editor, *Proceedings of Vision in Vehicles*, pages 70–81, Amsterdam, 1996. Elsevier Science.
- [Sar36] Jean-Paul Sartre. *Esquisse d’une théorie des émotions*. Gallimard, Paris, 1936.
- [Sar07] Nicolas Sarkozy. Grenelle de l’environnement, Discours de M. le Président de la République. Présidence de la République Française, Paris, Octobre 2007.
- [sar09] sari.prd.fr. Site web du projet Predit SARI, 2005-2009.
- [SC99] D. J. Simons and C. F. Chabris. Gorillas in our midst : sustained inattention blindness for dynamic events. *Perception*, 28(9) :1059–1074, 1999.
- [Ser82] Jean Serra. *Image Analysis and Mathematical Morphology, Vol. I*. Academic Press, London, 1982.
- [Ser88] Jean Serra. *Image Analysis and Mathematical Morphology, Vol. II : Theoretical Advances*. Academic Press, London, 1988.
- [SET92] SETRA & CETUR. *Sécurité des Routes et des Rues*. SETRA and CETUR, 1992.
- [Shi07] D. Shinar. *Traffic safety and human behavior*. Emerald Group Publishing Limited, 2007.
- [SHS⁺04] Helge Seetzen, W. Heidrich, W. Stuerzlinger, Greg Ward, L. Whitehead, M. Trentacoste, A. Ghosh, and A. Vorozcovs. High dynamic range display systems. *ACM Transactions on Graphics*, 23(3) :760–768, 2004.
- [Sim09a] Sim2. *Solar 47 : HDR LCD display*. Dolby and SIM2, 2009. <http://www.sim2.com/home/en/grand-cinema-solar>.
- [Siv96] M. Sivak. The information that drivers use : is it indeed 90% visual? *Perception*, 25 :1081–1089, 1996.
- [SP94] François Sillion and Claude Puech. *Radiosity and Global Illumination*. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, 1994. ISBN 1-558.
- [SSR98] R. J. Snowden, N. Stimpson, and R. A. Ruddle. Speed perception fogs up as visibility drops. *Nature*, 392(6675) :450, 1998.
- [Sto72] T. G. Stockham. Image processing in the context of a visual model. *IEEE*, 60(7) :828–841, 1972.

- [TBC08] Jean-Philippe Tarel, Erwan Bigorgne, and Pierre Charbonnier. Méthodes de mesure de la visibilité géométrique. Livrable 1.2.4 du projet PREDIT VIZIR, LCPC, 2008.
- [TC06] Jean-Philippe Tarel and Hicham Choukour. Expérimentation visant à tester un modèle de calcul de la saillance attentionnelle. Rapport interne, LCPC, 2006.
- [TRM07] D. Thalmann and S. Raupp Musse. *Crowd Simulation*. Springer Computer Science, 2007.
- [Vap95] V. Vapnik. *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer, 1995.
- [Vos03] J. J. Vos. On the cause of disability glare and its dependence on glare angle, age and ocular pigmentation. *Clinical and Experimental Optometry*, 6(86) :363–370, 2003.
- [Wan95] Brian Wandell. *Foundations of vision*. Sinauer associates, Sunderland, MA, USA, 1995.
- [Wan09] P. O. Wanvik. Effects of road lighting : An analysis based on dutch accident statistics 1987-2006. *Accident Analysis & Prevention*, 41(1) :123–128, 2009.
- [War94] Greg Ward. A contrast-based scalefactor for luminance display. *Graphics Gems IV*, pages 415–421, 1994.
- [Wes90] Donald Westlake. *Drowned hopes*. 1990. trad. fr. Dégats des eaux, Payot, Paris.
- [Win05] S. Winkler. *Digital video quality : vision models and metrics*. Wiley, NY, 2005.
- [Woo02] J. M. Wood. Age and visual impairment decrease driving performance as measured on a closed-road circuit. *Human Factors*, 44(3) :482–494, 2002.
- [WRP97] Greg Ward, 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) :291–306, 1997.
- [WS98] Greg Ward and Rob Shakespeare. *Rendering with Radiance. The Art and Science of Lighting Visualization*. Morgan Kaufmann Publishers, 1998.
- [YBMS05] A. Yoshida, V. Blanz, Karol Myszkowski, and Hans-Peter Seidel. Perceptual evaluation of tone mapping operators with real world scenes. In *Proceedings of the SPIE*, volume 5666, pages 192–203, 2005.

Annexe : Acronymes

A

AAP	<i>Accident Analysis and Prevention</i>
ACM	<i>Association for Computing Machinery</i>
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AERES	Agence d'Evaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur
AFIG	Association Française d'Informatique Graphique
AFE	Association Française de l'Eclairage
AIPCR	Association Mondiale de la Route (<i>PIARC</i>)
AITF	Association des Ingénieurs Territoriaux de France
ALS	<i>Automotive Lighting Systems</i>
ANR	Agence Nationale de la Recherche
AV	Aménagement Virtuel (GIS)

C

CEN	Comité Européen de Normalisation
CERTU	(ex-CETUR) Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques (MEEDM)
CETE	Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement (MEEDM)
CETU	Centre d'Etude des Tunnels
CG	Conseil Général
CHU	Centre Hospitalo-Universitaire
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage
CLOVIS	Clovis est un Local de Visualisation d'Images de Synthèse
CMM	Centre de Morphologie Mathématique (ENSMP)
CNFE	Centre National Français de l'Eclairage
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
COPIE	Plateforme intégratrice de l'INRETS sur le Comportement des PIETons
CRT	<i>Cathod Ray Tube</i>
CUiSS	Club des Utilisateurs de la Simulation et des Simulateurs

D

DAC	Directions d'Administration Centrale
DEA	Diplôme d'Etudes Approfondies, ancien nom du Master Recherche
DESE	Division Exploitation, Signalisation, Eclairage du LCPC

DESS Diplôme d'Etudes Scientifiques Supérieures (ex-Master Pro)
 DEViSE Diagnostic En Ville par des Scénarios d'Eclairage
 DGI Direction Générale des Infrastructures (MEEDM)
 DLP *Digital Light Processing*
 DR Direction des Routes (MEEDM), ancien nom de la DGI
 DRAST Direction de la Recherche et des Actions Scientifiques et Techniques,
 (MEEDM), aujourd'hui DRI (MEEDM)
 DRI Direction de la Recherche et de l'Innovation (MEEDM)
 DSC *Driving Simulation Conference*
 DSCR Direction de la Sécurité et de la Circulation Routière (MEEDM)

E

ENPC Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
 ENSMP Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris
 ENST Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications
 ERLPC Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées
 ESPCI Ecole Supérieure de Physique Chimie Industrielle

F

FET Future and Emerging Technologies - Open Scheme (PCRD)
 FSR Fondation Sécurité Routière
 FUI Fond Unique Interministériel

G

GIS Groupement d'Intérêt Scientifique
 GNCDS Groupe National sur les Caractéristiques des Chaussées

H

HDR *High Dynamic Range*
 HQE Haute Qualité Environnementale

I

IED Institut d'Enseignement à Distance, Université Paris VIII
 IESNA *Illuminating Engineering Society of North America*
 IFP Institut Français du Pétrole
 INRETS Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité
 ITS *Intelligent Transport Systems*
 IUT Institut Universitaire de Technologie

J

JEI *Journal of Electronic Imaging*
 JND *Just Noticeable Difference*
 JOSA *Journal of the Optical Society of America*
A : Optics, image science and vision

L

LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LDR	<i>Low Dynamic Range</i>
LEPSiS	Laboratoire Exploitation, Perception, Simulation et Simulateurs, UMR LCPC-INRETS,
LISE	Logiciel d'Images de Synthèse pour l'Eclairage
LIVIC	Laboratoire Interactions Véhicule Infrastructure Conducteur
LRPC	Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées
LRT	<i>Lighting Research and Technology</i>

M

MEEDM	Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer
mlpc	Matériel des Laboratoires des Ponts et Chaussées
MNHN	Museum National d'Histoire Naturelle
MSiS	Unité de Recherche Modélisation, Simulation et Simulateurs de l'INRETS

O

OSG	<i>Open Scene Graph</i>
-----	-------------------------

P

PCRD	Programme Cadre Recherche et Développement de la Communauté Européenne
PREDIT	Programme de REcherche et D'Innovation dans les Transports
PRES	Pôle de Recherche et d'Enseignement Supérieur

R

RNTL	Réseau National Technologies Logicielles
RST	Réseau Scientifique et Technique du MEDDAT
RVI	Renault Véhicules Industriels, aujourd'hui Renault Trucks

S

SARI	Surveillance Automatisée des Routes pour l'Information des conducteurs et des gestionnaires
SEMAPHORE	Simulation d'Eclairage de Maquettes virtuelles PHOtométriquement REalistes
SELF	Société d'Ergonomie de Langue Française
SETRA	Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes
SHS	Sciences Humaines et Sociales
SIGI	<i>Silicon Graphics</i>
SICAP	SImulation de Traversée de Carrefour par des Piétons (projet FSR)
SPI	Sciences Pour l'Ingénieur
SRSR	GIS sur la Simulation pour les Recherches sur la Sécurité Routière

STC	Services Techniques Centraux du MEEDM
SVM	<i>Support Vector Machine</i>
T	
TMO	<i>Tone Mapping Operator</i>
TR-F	<i>Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behavior</i>
U	
UMTRI	<i>University of Michigan - Transportation Research Institute.</i>
UMR	Unité Mixte de Recherche
UFR	
UPC	Universitat Politecnica de Catalunya (Barcelone, Espagne)
V	
VITRES	Innovation dans la Ville, les Infrastructures de Transports, les Réseaux, l'Environnement et les Services (institut Carnot)
VIZIR	Vision Intelligente des Zones et Itinéraires à Risque (projet PREDIT)
VL	<i>Visibility Level</i>
VNF	Voies Navigables de France
VPV	Visibilité des Piétons en Ville (projet PREDIT)
W	
WetIm	<i>Physically-Based Modelling and Rendering for Wet Surfaces (projet PCRD)</i>