

# Simulation numérique de capteurs perceptifs du véhicule autonome sous conditions météorologiques dégradées

Ambition française et européenne, le développement de la mobilité automatisée est au cœur de nombreuses feuilles de route d'associations professionnelles du secteur de la mobilité ou des institutions porteuses des politiques publiques de développement économique et sociétal. Ces réflexions et plans d'action soulignent notamment l'approche (i) par scénarios de conduite dans la démonstration de sécurité des systèmes de transport routier automatisés<sup>1</sup> (STRA), autorisés sous certaines conditions en France par le décret 2021-873 du 29 juin 2021, incluant même des scénarios par simulation numérique<sup>2</sup>, (ii) avec la prise en compte des conditions météorologiques dégradées parmi les différentes couches (infrastructure, objets sur la route, manœuvres, etc.) permettant de décrire un scénario (projets français ADScene-MOSAR, allemand PEGASUS, hollandais StreetWise, israélien CDV, etc.). Pour assurer un déploiement réussi de la mobilité automatisée, à la fois sûr et sécuritaire, la feuille de route<sup>3</sup> de ATEC ITS France porte un accent particulier à la connectivité entre véhicules et infrastructure, rejoignant ici la position communautaire<sup>4</sup>, reposant sur des cartes digitales partagées incorporant entre autres les caractérisations météorologiques de l'environnement pour assurer une gestion optimisée et la plus sûre possible.

L'équipe de recherche STI du Cerema, en s'appuyant sur sa plateforme PAVIN Brouillard Pluie, développe des simulateurs numériques de capteurs perceptifs (caméra, lidar) sous conditions de brouillard notamment. Nous proposons dans cette communication une évaluation de différentes modélisations retenues dans les simulateurs actuels et discutons notamment leur réalisme qui un enjeu majeur lorsque la simulation devient un outil d'évaluation de la sécurité du véhicule automatisé.

## 1. L'équipe de recherche STI et la plateforme PAVIN

Le Cerema s'implique dans le domaine du véhicule automatisé et connecté, stratégique pour le développement de la mobilité intelligente, en accompagnement à la fois des acteurs économiques, des collectivités et de l'administration dans la mise en place du cadre réglementaire d'homologation, mais également dans l'expérimentation et l'évaluation des technologies, des systèmes et des services associés.

L'équipe de recherche Systèmes de Transports Intelligents (STI) travaille en particulier sur l'évaluation des systèmes d'automatisation de la conduite. Les travaux de cette équipe de recherche s'appuient fortement sur la plateforme PAVIN BP (Plateforme Auvergne pour Véhicules Intelligents Brouillard & Pluie, Clermont-Ferrand). Cette dernière est sollicitée par de nombreuses commandes de clients nationaux, européens et internationaux du secteur automobile (industriels français, allemands, italiens, suédois, indiens, canadiens, israéliens, etc.) et également valorisée lors de partenariats avec cofinancement par une subvention sur projets ANR, FUI, H2020, Horizon Europe comme les projets DENSE, AWARD ou ROADVIEW. On peut noter des partenaires tels que Renault, PSA, Valeo, Daimler ou encore Easymile.

L'équipement constitue une composante du LABEX ImobS3 « Mobilité innovante : solutions intelligentes et durables », et il est identifié comme plateforme d'évaluation des véhicules intelligents (PAVIN) de l'I-SITE CAP 2025, projet structurant de l'Université Clermont-Auvergne (UCA) et au niveau national dans les sites d'essais du plan France Véhicule Autonome.



I-SITE  
CLERMONT  
Clermont Auvergne Project

<sup>1</sup> Ministère de la transition écologique, Rapport méthodologique « Démonstration de sécurité des systèmes de transport routier automatisés : Apports attendus des scénarios de conduite », 2022

<sup>2</sup> World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations, « New Assessment/Test Method for Automated Driving (NATM) », 2021

<sup>3</sup> ATEC ITS France, Feuille de route « Véhicule automatisé & connecté, Etat des lieux, enjeux et préconisations », 2021

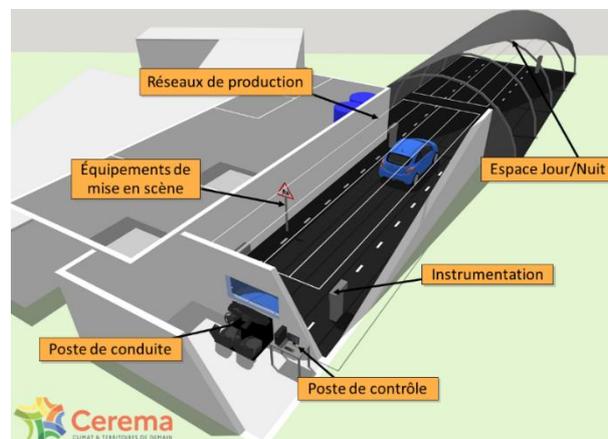
<sup>4</sup> CCAM (Connected Cooperative Automated Mobility) Partnership, Strategic Research and Innovation Agenda 2021-2027

L'installation se présente sous la forme d'une piste couverte de 30 m de long, spécifiquement aménagée et instrumentée avec différents matériels : générateur de pluie et brouillard, capteurs météorologiques de pointe, capteurs de vision de référence.

Face au poste de contrôle, la piste est structurée en deux parties (tunnel en dur et serre avec couverture opaque amovible), ce qui permet de réaliser des essais en conditions de jour comme de nuit, selon une grande variété de scénarios.

De nombreuses conditions météorologiques sont reproductibles au sein de la plateforme :

- Brouillard dense à léger par dissipation (non stabilisé), visibilité météorologique de 10 m à 1 000 m.
- Brouillard dense par palier stabilisé, visibilité météorologique de 10 m à 80 m.
- 2 types de granulométrie du brouillard, radiation (0,8 microns) et advection (0,8 à 8 microns).
- Pluie forte par palier stabilisé, intensité de pluie de 20 mm/h (durée de 100 minutes maximum) à 180 mm/h (durée de 9 minutes maximum).



Cela permet de réaliser une typologie d'études très variée :

- Validation de capteurs et produits à déployer en extérieur.
- Mesure de performance des systèmes d'aide à la conduite / ADAS (ex : détecteurs de piétons et d'obstacles).
- Mesure de la performance de systèmes de signalisation et d'éclairage innovants.
- Étude de la perception du conducteur en conditions de visibilité réduite.
- Développement de nouvelles technologies d'imagerie adaptées aux conditions de brouillard et pluie (ex : infrarouge, laser, radar).
- Comparaison entre systèmes de vision artificielle et humaine.
- Conception d'algorithmes d'analyse et de traitement d'images et de nuages de point 3D.

## 2. La simulation numérique : outil d'évaluation des technologies de la mobilité automatisée

Le développement des véhicules automatisés nécessite l'intégration de plusieurs technologies d'aide à la conduite basées sur des dispositifs optiques tels que le radar, le LiDAR, la caméra, etc. Ils sont utilisés pour la détection d'obstacles ou de piétons, la reconnaissance des panneaux de signalisation, la correction de trajectoire, etc. La sécurité liée aux performances de ces dispositifs est une question importante. Il est bien connu que ces dispositifs sont perturbés par des conditions météorologiques défavorables comme la pluie, la neige ou le brouillard. Par conséquent, les équipementiers et les constructeurs automobiles cherchent avant tout à rendre les différentes technologies plus fiables en les testant dans des conditions extrêmes et dans les situations les plus exhaustives possible. Pour ce faire, les capteurs de perception et d'aide à la conduite, qui fonctionnent dans différentes longueurs d'onde, doivent prendre en compte les différentes conditions météorologiques ainsi qu'une grande variété de cibles à détecter ou à reconnaître dans la scène routière. Notons qu'il n'est généralement pas possible de tester ces technologies avancées et complexes en se basant uniquement sur des tests expérimentaux. Pour cette raison, des solutions de simulation numérique sont développées pour tester massivement des technologies nouvelles et variées dans les conditions les plus exhaustives, ce qui n'est pas possible exclusivement par voie expérimentale.

Le projet européen ROADVIEW (Robust Automated Driving in Extreme Weather, 2022-2026), qui finance les travaux de cette communication, a pour objectif de traiter l'impact des conditions météorologiques difficiles sur les capteurs de perception automobile. Le Work Package 3, consacré à la simulation numérique, développe la modélisation de bruits météorologiques à apporter aux simulations de capteurs optiques pour représenter les variations des caractéristiques des conditions météorologiques difficiles et ainsi générer des données de capteurs synthétiques réalistes. L'objectif est de mettre au point des tests de véhicules automatisés, incorporant les conditions météorologiques, par des méthodes comprenant de la simulation numérique.

Il existe aujourd'hui des simulateurs de capteurs optiques (caméra, radar, LiDAR) qui prennent en compte les conditions atmosphériques telles que le brouillard ou la pluie. Nous pouvons citer quelques logiciels : Ansys AVxcelerate Sensors, Carla Simulator, Pro-SiVIC, Electro-Optics sensor simulation, AVSimulation, 4DVirtualiz, etc. Différents modèles de propagation des ondes électromagnétiques sont utilisés dans ces simulateurs, allant de simples lois d'atténuation de type Beer-Lambert à des simulations complexes de lancers de rayons lumineux.

L'un des objectifs de nos travaux dans le projet ROADVIEW est de comparer un simulateur 1D simplifié et communément utilisé, basé sur les lois d'atténuation du contraste de Koschmieder, et un simulateur Monte-Carlo complet développé par le Cerema, appelé SWEET (Simulating WEather for intElligent Transportation systems). Plus précisément, nous nous intéressons à la comparaison du réalisme des images de caméra simulées pour deux scènes (scène urbaine et scène interurbaine) basées sur le simulateur SWEET et sur le modèle 1D simplifié.

### 3. Simulation de deux scènes en présence de brouillard

Le simulateur SWEET peut être utilisé de différentes manières en fonction de ce que l'utilisateur veut calculer, qu'il s'agisse de quantités physiques telles que la luminance et l'éclairement, dans n'importe quel domaine de longueur d'onde, ou de la simulation d'un capteur entier (c'est-à-dire une caméra, un LiDAR...). Nous présentons ici deux cas d'utilisation pour la simulation d'une scène routière avec une caméra embarquée dans un véhicule ego, en situation urbaine sur la figure 1a et interurbaine sur la figure 2a.

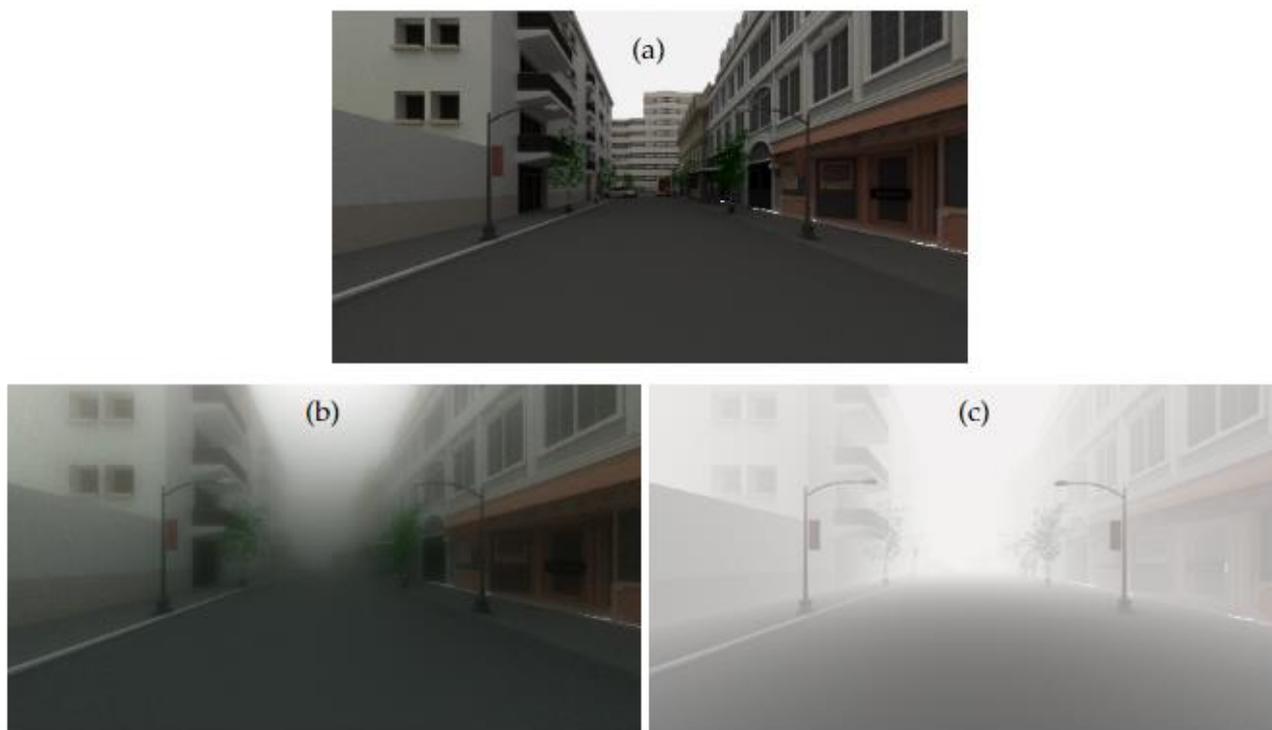


Figure 1 - Images simulées pour une scène urbaine avec le simulateur SWEET sans brouillard (a) et avec brouillard (visibilité 20m) (b) et avec le modèle Koschmieder (c) en conditions diurnes.

On peut constater, en comparant les figures 1b et 1c d'une part et les figures 2b et 2c d'autre part, un effet différencié du brouillard simulé par le simulateur 3D SWEET (b) et par le modèle simplifié de Koschmieder (c). Ce dernier modèle ajoute un voile blanc sur toute l'image qui est bien moins réaliste que l'effet produit par le simulateur SWEET, lequel propage les rayons lumineux sur des bases physiques plus complètes, en prenant en compte notamment les multidiffusions de la lumière sur les gouttes de brouillard (théorie de Mie).

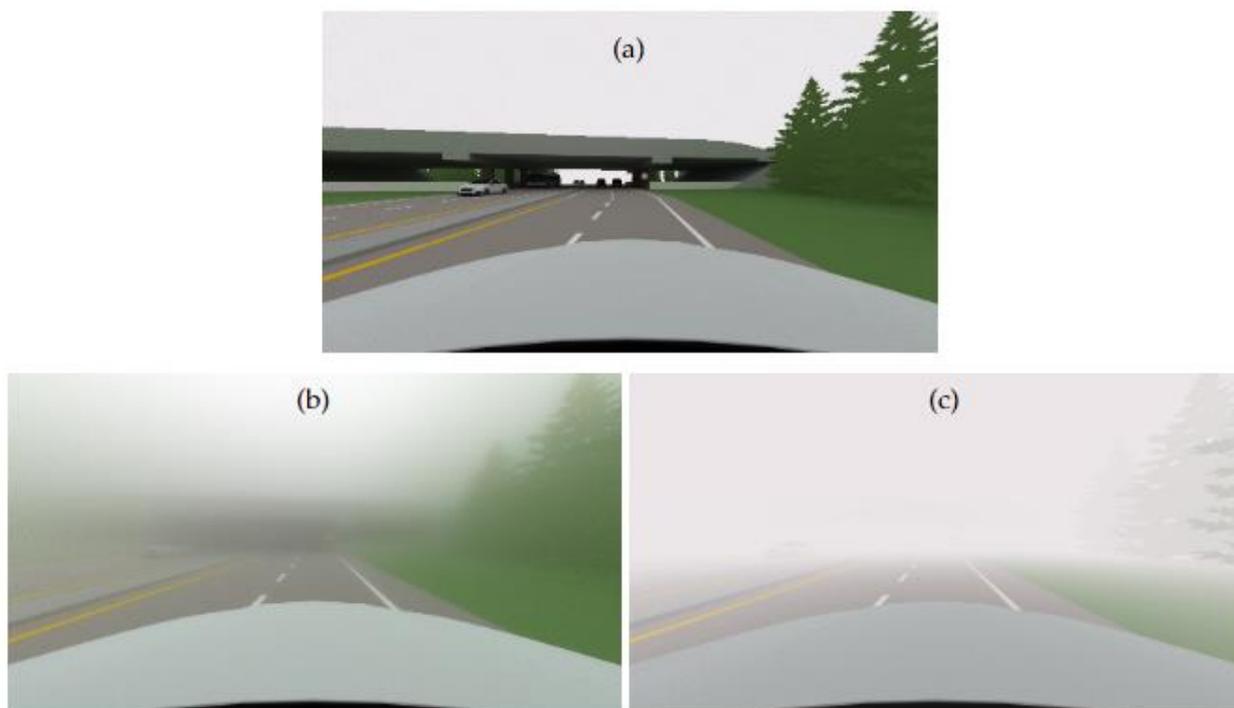


Figure 2 - Images simulées pour une scène interurbaine avec le simulateur SWEET sans brouillard (a) et avec brouillard (visibilité 20m) (b) et avec le modèle Koschmieder (c) en conditions diurnes.

Des commentaires similaires peuvent être émis pour la condition nocturne (figure 3). On remarquera en particulier l'absence de halos autour des sources de lumière lorsque le modèle simplifié de Koschmieder est utilisé pour ajouter un brouillard sur l'image.

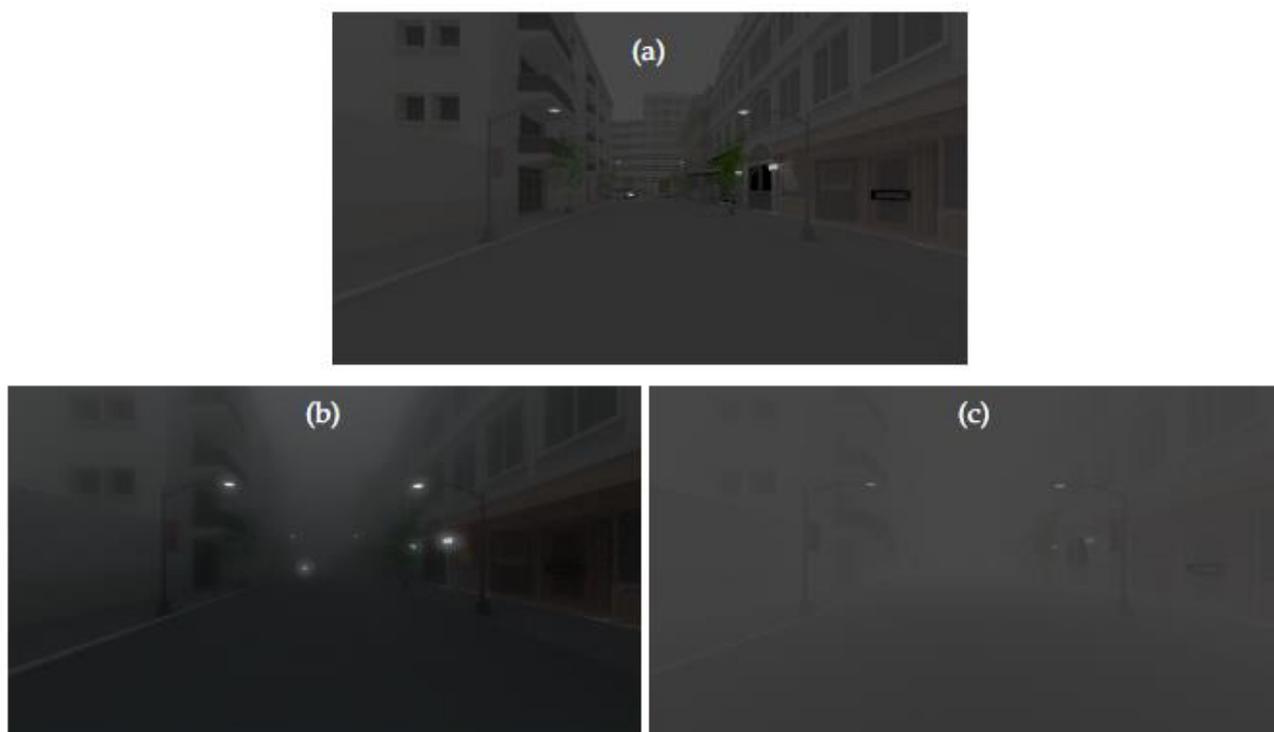


Figure 3 - Images simulées pour une scène urbaine avec le simulateur SWEET sans brouillard (a) et avec brouillard (visibilité 20m) (b) et avec le modèle Koschmieder (c) en conditions nocturnes.

#### 4. Comparaison des simulateurs par des métriques portant sur le contraste

Pour quantifier les différences d'effets visuels entre les modèles de simulation du brouillard, des métriques objectives peuvent être employées. On s'appuiera sur les images simulées de la figure 1 et les images réelles de la figure 4.



Figure 4 - Images de caméra réelle prises sur une section de l'autoroute A75 (Col de la Fageole) sans brouillard (a) et avec brouillard (b).

On fournit ici l'exemple du suivi d'intensité dans l'image le long d'un segment franchissant des zones contrastées (segment rouge dans les images la figure 5).

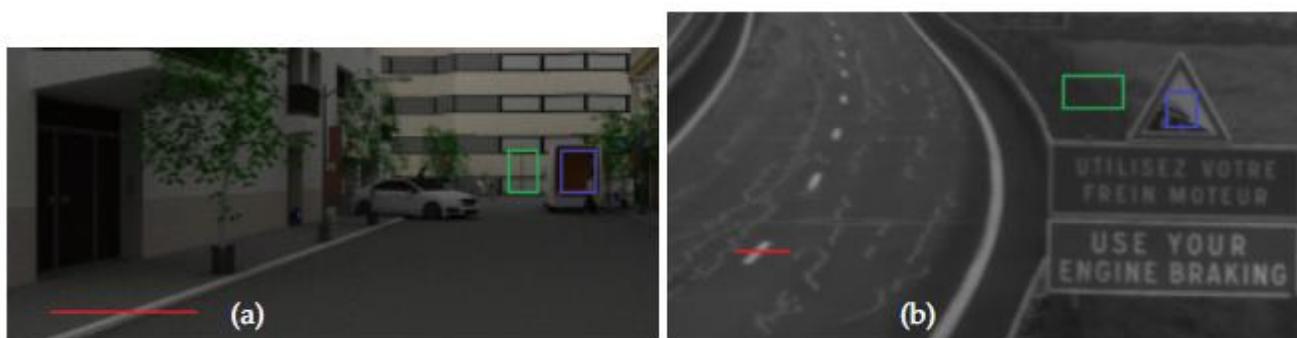


Figure 5 - Segments de pixels (rouge) pour la scène urbaine simulée (a) et la scène réelle d'une section de l'autoroute A75 (Col de la Fageole) (b).

Les résultats sont portés sur la figure 6 comparant l'intensité d'un segment de pixels, avec et sans brouillard, pour des images provenant d'une caméra réelle (a), du simulateur SWEET (b) et de Koschmieder (c). Plus précisément, chaque canal de couleur (rouge, vert et bleu) est fourni (les courbes sont identiques pour l'image réelle car en niveaux de gris), sans brouillard en trait plein et avec brouillard en traits pointillés. On constate des formes de courbes très proches entre celles de la figure 6a (image réelle) et celles de la figure 6b (image simulée par SWEET). Le comportement de l'indicateur pour les images simulées par le modèle de Koschmieder est nettement éloigné du comportement en situation réelle.

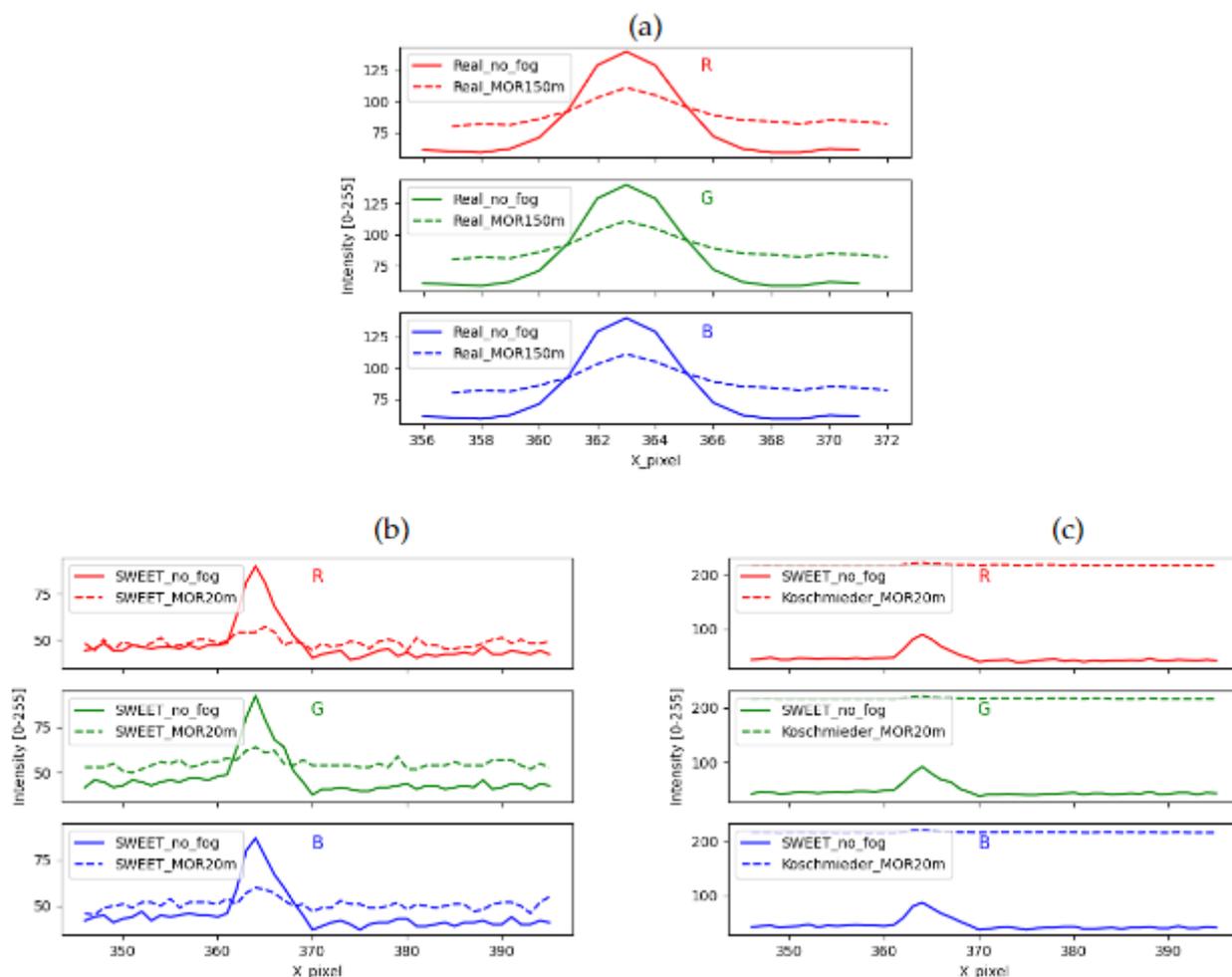


Figure 6 - Comparaison de l'intensité d'un segment de pixels, avec et sans brouillard, pour des images provenant d'une caméra réelle (a), du simulateur SWEET (b) et de Koschmieder (c).

## 5. Conclusion

Pour l'évaluation et la conception de capteurs optiques pour les véhicules automatisés, la simulation numérique est un outil qui permet d'approcher la réalité dans de nombreuses configurations et avec différents degrés de réalisme. Dans ce contexte, l'outil de simulation SWEET développé par le Cerema répond aux besoins de la recherche sur la simulation de scènes routières dans des conditions météorologiques dégradées, dont le brouillard. Le choix d'utiliser des méthodes de Monte Carlo (ray-tracing) dans ce simulateur est justifié par la précision des résultats et le réalisme attendus des scènes simulées. D'autres méthodes basées sur des modèles simplifiés de propagation électromagnétique à travers le brouillard peuvent être utilisées car elles peuvent atteindre une exécution en temps réel. Dans cette communication, le simulateur SWEET a été comparé au modèle simplifié de Koschmieder, qui est largement utilisé dans la simulation des effets de brouillard dans les images pour les applications automobiles. La comparaison visuelle des images obtenues par les deux modèles (i.e. SWEET vs. Koschmieder) a permis d'apprécier le réalisme de SWEET qui reproduit des effets réels observables dans les images de scènes routières (i.e. effet de flou, effet de halo, etc.). Ces observations visuelles ont ensuite été quantifiées à l'aide de métriques sur les lignes de pixels. Les résultats obtenus dans ce travail montrent une bonne correspondance des métriques entre les images de brouillard réelles et les images du simulateur SWEET. Le modèle de Koschmieder montre des déviations par rapport aux images réelles.

Les travaux futurs consisteront à poursuivre la comparaison entre SWEET et le modèle de Koschmieder sur une plus grande variété d'images, pour d'autres niveaux de brouillard, d'autres métriques d'intérêt qui pourraient être construites sur des indicateurs de plus haut niveau, comme des algorithmes de détection d'obstacles ou de piétons par exemple. Il sera également utile, en utilisant la plateforme PAVIN ou des sites naturels instrumentés par le Cerema et ses partenaires, de valider les sorties physiques de luminance du simulateur SWEET par des mesures expérimentales acquises par un

spectroradiomètre ou une caméra hyperspectrale. Une autre perspective sera de constituer une base de données d'images générées par SWEET afin d'entraîner des algorithmes d'apprentissage automatique capables de fournir des modèles de bruit météorologique pour la simulation des capteurs optiques pouvant être exécutés en temps réel. Les travaux pourront également être étendus à d'autres longueurs d'onde pour les caméras fonctionnant dans les gammes de l'infrarouge (SWIR et LWIR), ou à des technologies actives telles que le LiDAR et le RADAR.

Amine BEN DAOUED  
Chercheur  
Chargé de recherche en simulation numérique et IA pour les STI



Amine Ben Daoued est diplômé de l'école d'ingénieur ENIG (Tunisie) et soutient en 2019 une thèse de doctorat en modélisation des systèmes urbains (Université de Technologie de Compiègne). Il est actuellement chercheur dans l'équipe STI et travaille sur différents sujets en lien avec la simulation numérique des systèmes de transport en conditions météorologiques dégradées et l'intelligence artificielle.

Il travaille sur plusieurs sujets de recherche en lien avec la simulation de capteurs dans des conditions météorologiques dégradées.

Frédéric BERNARDIN  
Chercheur HDR  
Responsable du groupe recherche STI



Frédéric Bernardin est diplômé de l'école d'ingénieur ENTPE de Lyon et soutient en 2004 une thèse de doctorat en mathématiques appliquées (Université de Lyon). En 2017, il obtient de l'Université Clermont Auvergne une HDR (habilitation à diriger des recherches) et a encadré (ou encadre actuellement) plus de 10 thèses de doctorat (5 sont liées à la dynamique stochastique pour les véhicules routiers et aux conditions météorologiques défavorables dans un contexte routier).

Il a mené et géré des projets de recherche sur l'impact des conditions météorologiques défavorables sur la visibilité et la surface de la route et sur le développement des ADAS par une approche probabiliste. Dr Bernardin est l'auteur de plus de 50 publications scientifiques.

Il est actuellement responsable du groupe recherche Systèmes de transport intelligents du Cerema à Clermont-Ferrand.

Pierre DUTHON  
Chercheur – Ingénieur  
Adjoint au responsable du groupe recherche STI



Pierre Duthon est diplômé de l'école d'ingénieur ENTPE de Lyon et soutient en 2017 une thèse de doctorat en optique et vision par ordinateur de (Université Clermont Auvergne) sur l'impact des conditions météorologiques dégradées sur les systèmes de vision par ordinateur dans un contexte routier. Il est actuellement ingénieur chercheur dans l'équipe STI et travaille sur différents sujets en lien avec la vision par ordinateur, les conditions météorologiques dégradées (brouillard ou pluie) et l'intelligence artificielle. Par ailleurs, il est pilote pour le Cerema du projet H2020 AWARD.

Il a déjà travaillé sur plusieurs sujets de recherche en lien avec l'optique et le traitement d'images, comme l'optimisation des algorithmes de saillance dans un contexte routier, l'optimisation d'un luminancemètre basé sur une caméra par analyse spectrale ou l'implémentation et le développement d'algorithmes de défloutage. Il a également déjà participé à de nombreux projets européens. Il occupe la fonction d'adjoint au responsable du groupe recherche Systèmes de transport intelligents du Cerema à Clermont-Ferrand.



#### ROADWIEW

*Co-funded by the European Union (grant no. 101069576) and supported by Innovate UK (contract no. 10045139) and the Swiss State Secretariat for Education, Research and Innovation (contract no. 22.00123). Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency (CINEA). Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.*