

	Compte-rendu de fin de projet	

<p align="center">Projet ANR-17-CE38-0009-01</p> <p align="center">PrISE-3D</p> <p align="center">Programme AAP GÉNÉRIQUE 2017</p>

A IDENTIFICATION	2
B RÉSUMÉ CONSOLIDÉ PUBLIC	2
B.1 Instructions pour les résumés consolidés publics	2
B.2 Résumé consolidé public en français	3
B.3 Résumé consolidé public en anglais	3
C MÉMOIRE SCIENTIFIQUE	3
C.1 Résumé du mémoire	4
C.2 Enjeux et problématique, état de l'art	4
C.3 Approche scientifique et technique	4
C.4 Résultats obtenus	4
C.5 Exploitation des résultats	4
C.6 Discussion	4
C.7 Conclusions	4
C.8 Références	4
D LISTE DES LIVRABLES	4
E IMPACT DU PROJET	5
E.1 Indicateurs d'impact	5
E.2 Liste des publications et communications	6
E.3 Liste des éléments de valorisation	6
E.4 Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires)	7

A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	PrISE-3D
Titre du projet	Perception, Interactions et Simulation de l'Éclairage 3D
Coordinateur du projet (société/organisme)	Samuel Delepouille LISIC - Calais
Période du projet (date de début – date de fin)	1 janvier 2018 31 décembre 2021
Site web du projet, le cas échéant	https://prise3d.univ-littoral.fr/

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	M. Samuel Delepouille
Téléphone	06 33 08 59 51
Adresse électronique	samuel.delepouille@univ-littoral.fr
Date de rédaction	30 juin 2022

Si différent du rédacteur, indiquer un contact pour le projet	
Civilité, prénom, nom	
Téléphone	
Adresse électronique	

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	LISIC SCALab
---	-----------------

B RÉSUMÉ CONSOLIDÉ PUBLIC

B.1 RÉSUMÉ CONSOLIDÉ PUBLIC EN FRANÇAIS

EXPLOITER LES LIMITES DE LA PERCEPTION VISUELLE POUR GUIDER LE PROCESSUS DE RENDU PHOTO-RÉALISTE

Comprendre la perception visuelle du bruit haute fréquence des méthodes de rendu photo-réalistes

Le projet PrISE-3D (Perception, Interaction et Simulation d'Éclairage 3D) visait à mieux comprendre les spécificités perceptives humaines afin de guider des algorithmes de rendu d'images photo-réalistes. Le problème clé de ces algorithmes réside dans la production d'artefacts visuels au début du processus de calcul, qui se résorbent progressivement durant la progression de celui-ci, sans que l'on ne dispose de méthode précise permettant de juger de leur disparition pour le système visuel humain. PrISE-3D visait ainsi à emprunter les connaissances et méthodes de la psychologie expérimentale pour proposer des avancées notables permettant de mieux contrôler ces algorithmes.

Le projet s'est concentré sur le problème du bruit de haute fréquence qui apparaît lors des calculs de simulation d'éclairage. En recherchant les limites perceptives de la vision humaine associées à ce bruit, et en les intégrant au processus de calcul, l'objectif à long terme était de

produire des critères d'arrêt automatique des méthodes de simulation, permettant de réduire les coûts de calcul associés à ces méthodes, et donc le temps et le coût énergétique associé à leur utilisation.

Capture de seuils perceptifs et exploitation via des techniques d'apprentissage artificiel

Les travaux réalisés au cours du projet se sont situés à la frontière de l'algorithmique et des recherches sur la perception visuelle, et ont donc nécessité une appréhension de ces deux champs disciplinaires. En faisant appel à des méthodes et outils initialement développés dans le cadre de la psycho-physique, le projet a permis de quantifier précisément des seuils perceptifs concernant la perception du bruit visuel, tant dans des conditions expérimentales contrôlées qu'au travers d'expérimentations plus écologiques incluant un grand nombre de participants. Ces seuils ont été utilisés pour alimenter différentes méthodes d'apprentissage artificiel, à même par la suite de détecter la présence ou non de bruit haute fréquence visible par le système visuel humain dans différentes parties d'une image en cours de calcul.

Nos travaux ont également permis la création de bases d'images standardisées, utilisées par les chercheurs du projet et ouvertes à la communauté scientifique.

L'utilisation conjointe de méthodes psychophysiques adaptatives qui permettent d'estimer la fonction psychométrique en cours de la procédure de recueil des seuils (Quest+) et de l'enregistrement des mouvements oculaires s'est avérée particulièrement fructueuse dans le cadre du projet, et plusieurs méthodes d'apprentissage profond ont permis de rendre compte des données et ont été utilisées de manière efficace sur des données nouvelles.

Un problème d'artefacts bien spécifiques à la simulation d'éclairage par méthode de Monte Carlo a également été étudié et des techniques originales et efficaces ont été développées pour le traiter.

Le projet a donné lieu à huit publications internationales avec comité de lecture, dont quatre en revues, trois en conférences et une en tant que chapitre d'ouvrage. Ces publications couvrent les différents champs disciplinaires présents dans le projet (informatique graphique, apprentissage artificiel, psychologie de la perception mesures psychophysiques) et deux de ces communications associent des auteurs des deux partenaires. Deux dépôts logiciels ainsi que deux bases de données d'images, ont été créés et rendus publics.



Illustration de la notion de bruit perceptible dans l'image. Chaque partie de l'image est rendue avec un nombre d'échantillons par pixel qui varie de gauche à droite (de 1 à 10 000 échantillons par pixel).

Le projet PrISE-3D est un projet de recherche fondamentale et appliquée coordonné par Samuel Delepoulle. Il associe aussi Christophe Renaud et Laurent Madelain, ainsi que les

laboratoires LISIC et SCALab. Le projet a commencé en janvier 2018 et a duré 48 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 396k€.

B.2 RÉSUMÉ CONSOLIDÉ PUBLIC EN ANGLAIS

EXPLOITING THE LIMITS OF VISUAL PERCEPTION TO GUIDE THE PHOTOREALISTIC RENDERING PROCESS

Understanding the visual perception of high frequency noise in photorealistic rendering methods

The PrISE-3D (Perception, Interaction and Simulation of 3D Lighting) project aimed at better describing human perceptual specificities in order to guide photorealistic image rendering algorithms. The key problem with these algorithms is the production of visual artefacts at the beginning of the computation process, which are progressively resolved during the process, without any precise method for judging their actual appearance for the human visual system. PrISE-3D thus aimed to borrow knowledge and methods from experimental psychology to propose significant advances to better control these algorithms.

The project focused on the problem of high-frequency Monte-Carlo noise that appears during lighting simulation calculations. By investigating the perceptual limits of human vision associated with this noise, and integrating them into the computational process, the aim was to produce criteria for automatically stopping the simulations, thereby reducing the computational costs associated with these methods, as well as the time and energy costs associated with their use.

Capturing perceptual thresholds and exploitation via artificial learning techniques

The work carried out was located at the border of algorithmics and visual perception, and required an integrated study of these two disciplinary fields. Using advanced methods and tools developed for psychophysics, the project made it possible to quantify precise perceptual thresholds of visual noise perception, both under carefully controlled experimental conditions and through more ecological experiments involving large groups of participants. These thresholds were then used to feed various artificial learning methods, in order to better determine the presence or absence of high-frequency noise visible to the human visual system in different parts of an image under calculation.

The work allowed the creation of standardized image databases, used by the project's researchers and open to the scientific community.

The use of adaptive methods to estimate the psychometric function during the threshold collection procedure (Quest+) combined with eye movements recording has proved fruitful and several deep learning methods have been used to account for the data and effectively predict new data.

An artifact problem specific to Monte Carlo lighting simulation was also studied and original and efficient techniques were developed to deal with it.

The project resulted in eight international refereed publications, four in journals, three in conferences and one book chapter. These publications cover various disciplinary fields relevant for the project (computer graphics, artificial learning, psychophysical measurements) and two of these papers associate authors from both partners. Two software repositories and two image databases have also been created and made public.

The PrISE-3D project is a fundamental and applied research project coordinated by Samuel Delepoulle. It also involves Christophe Renaud and Laurent Madelain, as well as the LISIC and SCALab laboratories. The project started in January 2018 and lasted 48 months. It has received ANR funding of €396k.

C MÉMOIRE SCIENTIFIQUE

Mémoire scientifique confidentiel : non

C.1 RÉSUMÉ DU MÉMOIRE

EXPLOITER LES LIMITES DE LA PERCEPTION VISUELLE POUR GUIDER LE PROCESSUS DE RENDU PHOTO-RÉALISTE

Comprendre la perception visuelle du bruit haute fréquence des méthodes de rendu photo-réalistes

Le projet PrISE-3D (Perception, Interaction et Simulation d'Éclairage 3D) visait à mieux comprendre les spécificités perceptives humaines afin de guider des algorithmes de rendu d'images photo-réalistes. Le problème clé de ces algorithmes réside dans la production d'artefacts visuels au début du processus de calcul, qui se résorbent progressivement durant la progression de celui-ci, sans que l'on ne dispose de méthode précise permettant de juger de leur disparition pour le système visuel humain. PrISE-3D visait ainsi à emprunter les connaissances et méthodes de la psychologie expérimentale pour proposer des avancées notables permettant de mieux contrôler ces algorithmes.

Le projet s'est concentré sur le problème du bruit de haute fréquence qui apparaît lors des calculs de simulation d'éclairage (Kajiya, 1986). En recherchant les limites perceptives de la vision humaine associées à ce bruit, et en les intégrant au processus de calcul, l'objectif à long terme était de produire des critères d'arrêt automatique des méthodes de simulation, permettant de réduire les coûts de calcul associés à ces méthodes, et donc le temps et le coût énergétique associé à leur utilisation.

Capture de seuils perceptifs et exploitation via des techniques d'apprentissage artificiel

Les travaux réalisés se sont situés à la frontière de l'algorithmique et de la psychophysique de la perception visuelle, et ont nécessité une approche intégrée de ces deux champs disciplinaires. En faisant appel à des méthodes et outils avancés de la psychophysique des

associés à la manipulation des images en fonction de la position du regard,, le projet a permis d'obtenir des seuils perceptifs précis concernant la perception du bruit visuel dans des conditions expérimentales contrôlées que nous avons également évalués au travers d'expérimentations en ligne. Ces seuils ont ensuite été utilisés pour alimenter différentes méthodes d'apprentissage artificiel, à même par la suite de déterminer la présence ou non de bruit haute fréquence en différentes parties d'une image en cours de calcul.

Les travaux ont permis la création de bases d'images standardisées, utilisées par les chercheurs du projet et ouvertes à la communauté scientifique.

L'utilisation de méthodes adaptatives qui permettent d'estimer la fonction psychométrique en cours de la procédure de recueil des seuils (Quest+) s'est avérée particulièrement intéressante et plusieurs méthodes d'apprentissage profond ont permis de rendre compte des données et ont été utilisées de manière efficace sur des données nouvelles. Nous avons par ailleurs développé une nouvelle solution informatique permettant d'implémenter ce type de procédure pour des expérimentations en ligne. Le code informatique est mis à la disposition de la communauté.

Un problème d'artefacts bien spécifiques à la simulation d'éclairage par méthode de Monte Carlo a également été étudié et des techniques originales et efficaces ont été développées pour le traiter.

Le projet a donné lieu à huit publications internationales avec comité de lecture, dont quatre en revues, trois en conférences et une en tant que chapitre d'ouvrage. Ces publications couvrent les différents champs disciplinaires présents dans le projet (informatique graphique, apprentissage artificiel, mesures psycho-physiques) et deux de ces communications associent des auteurs des deux partenaires. Deux dépôts logiciels ainsi que deux bases de données d'images, ont été créés et rendus publics.

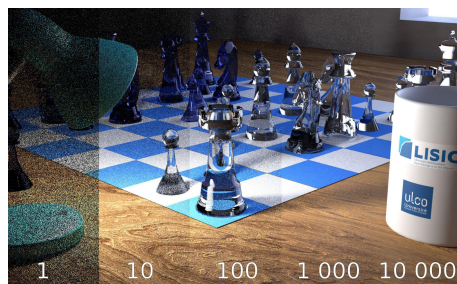


Illustration de la notion de bruit perceptible dans l'image. Chaque partie de l'image est rendue avec un nombre d'échantillons par pixel qui varie de gauche à droite (de 1 à 10 000 échantillons par pixel).

Le projet PrISE-3D est un projet de recherche fondamentale et appliquée coordonné par Samuel Delepoulle. Il associe aussi Christophe Renaud et Laurent Madelain, ainsi que les laboratoires LISIC et SCALab. Le projet a commencé en janvier 2018 et a duré 48 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 396k€.

C.2 ENJEUX ET PROBLÉMATIQUE, ÉTAT DE L'ART

Le projet PrISE-3D s'inscrit dans le cadre d'une meilleure intégration des spécificités perceptives humaines pour le pilotage de systèmes artificiels. Les outils de production

informatiques ont fait d'importants progrès au cours des dernières décennies, en grande partie grâce à l'évolution de la puissance de calcul. Cependant, l'utilisation rationnelle des ressources reste un enjeu important, tant sur le plan énergétique que pour l'intégration de contraintes temporelles.

La simulation d'éclairage est un domaine dans lequel cette problématique est particulièrement flagrante. Si elle permet désormais de produire des images de très haute qualité (dites "photoréalistes", car impossibles à différencier de photographies de scènes réelles), son utilisation en production reste freinée par la puissance de calcul requise par les algorithmes sous-jacents. À titre d'exemple, la production d'une seule image destinée à un film peut représenter plusieurs heures de calculs. Ce temps doit être multiplié par le nombre d'images composant le film et par le nombre de points de vue, dès lors que celui-ci doit être perçu en relief. Ceci aboutit à des temps de production considérables, de l'ordre de plusieurs années de temps CPU, et conduit également à des consommations électriques très importantes.

À l'inverse, les techniques de rendu temps réel, popularisées par les jeux vidéo, reposent sur une utilisation de matériels spécialisés (GPU) et des approximations importantes (modèles 3D, éclairage). Elles ont bénéficié de progrès importants dans des domaines majoritairement liés aux applications interactives (jeux vidéos, simulateurs, réalité virtuelle et augmentée). Elles restent cependant loin de pouvoir prétendre au photoréalisme et le recours à des algorithmes de simulation d'éclairage reste indispensable lorsqu'on souhaite un rendu exact et fidèle d'un point de vue physique et perceptif.

L'obtention de résultats physiquement exacts passe par l'utilisation d'algorithmes stochastiques, qui permettent d'explorer l'espace (potentiellement infini) des chemins lumineux transitant, au sein de la scène, entre la caméra et les sources de lumières. L'exploration progressive de cet espace permet d'assurer une convergence visuelle des algorithmes vers l'image finale, les étapes intermédiaires étant porteuses d'informations incomplètes qui se traduisent par du bruit visuel réparti de manière hétérogène sur la surface de l'image.

C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Le projet s'était donné deux objectifs scientifiques et techniques principaux :

1. automatiser le processus de détection des seuils de convergence visuelle des algorithmes de simulation d'éclairage stochastique dans le cadre d'images perçues ou non en relief, sur une grande variété de périphériques dédiés ;
2. intégrer les données issues de mesures perceptives, en vue de guider les algorithmes de synthèse d'images photoréalistes dans le cadre d'applications interactives (ordonnancement des zones de l'image et/ou des objets de la scène à rendre en priorité).

Ces deux objectifs permettent alors à réduire les temps de calcul d'une image avec, pour le premier, l'intégration de données perceptives humaines, permettant de ne réaliser que les calculs nécessaires en chaque zone de l'image et, pour le second point, de viser un rendu photoréaliste interactif, en répartissant les calculs en fonction de la tâche courante de l'utilisateur, afin de lui assurer un rendu de qualité sur les zones principales d'attention, tout en étudiant la perception de la dégradation des autres zones de l'image.

Pour atteindre ces objectifs, notre approche consiste à utiliser des systèmes d'apprentissage artificiel afin d'apprendre la notion de bruit perceptif sur des ensembles d'images de synthèse représentatifs des effets lumineux qui peuvent être présents dans une scène. L'utilisation des dispositifs de restitution en relief (casques de réalité virtuelle, lunettes 3D, écrans auto-stéréoscopiques, salles immersives, etc.), semble induire une restitution du bruit différente entre eux. Cette variabilité est encore accrue avec la possibilité d'utiliser des algorithmes qui réutilisent une partie des calculs entre images composant une vue (auto)stéréoscopique, en vue de réduire leur temps de calcul. Ces techniques provoquent cependant une corrélation du bruit entre images et, par conséquent, une perception très différente de ce dernier. Les modèles perceptifs obtenus pourraient ensuite être intégrés dans le cadre d'applications de rendu interactif 3D, de manière à en déterminer leur niveau d'ergonomie avec des utilisateurs.

Deux laboratoires étaient impliqués dans cette ANR :

- LISIC : l'équipe IMage et APprentissage de ce laboratoire développe des recherches dans le domaine de la simulation d'éclairage depuis plusieurs années. Elle s'intéresse en particulier à la problématique de l'apprentissage de la détection du bruit visuel dans les images de synthèse 3D ;
- SCALab : l'équipe AVA (Action, Vision et Apprentissage) possède une expertise relative aux méthodes psycho-physiques pour les mesures perceptives et l'étude de l'interaction perception-action.

Le projet a été découpé en 5 tâches distinctes (hors tâche de coordination), pilotées par chacun des deux partenaires, en interaction étroite avec le second. Ces tâches et leurs interactions sont rappelées dans la figure 1.

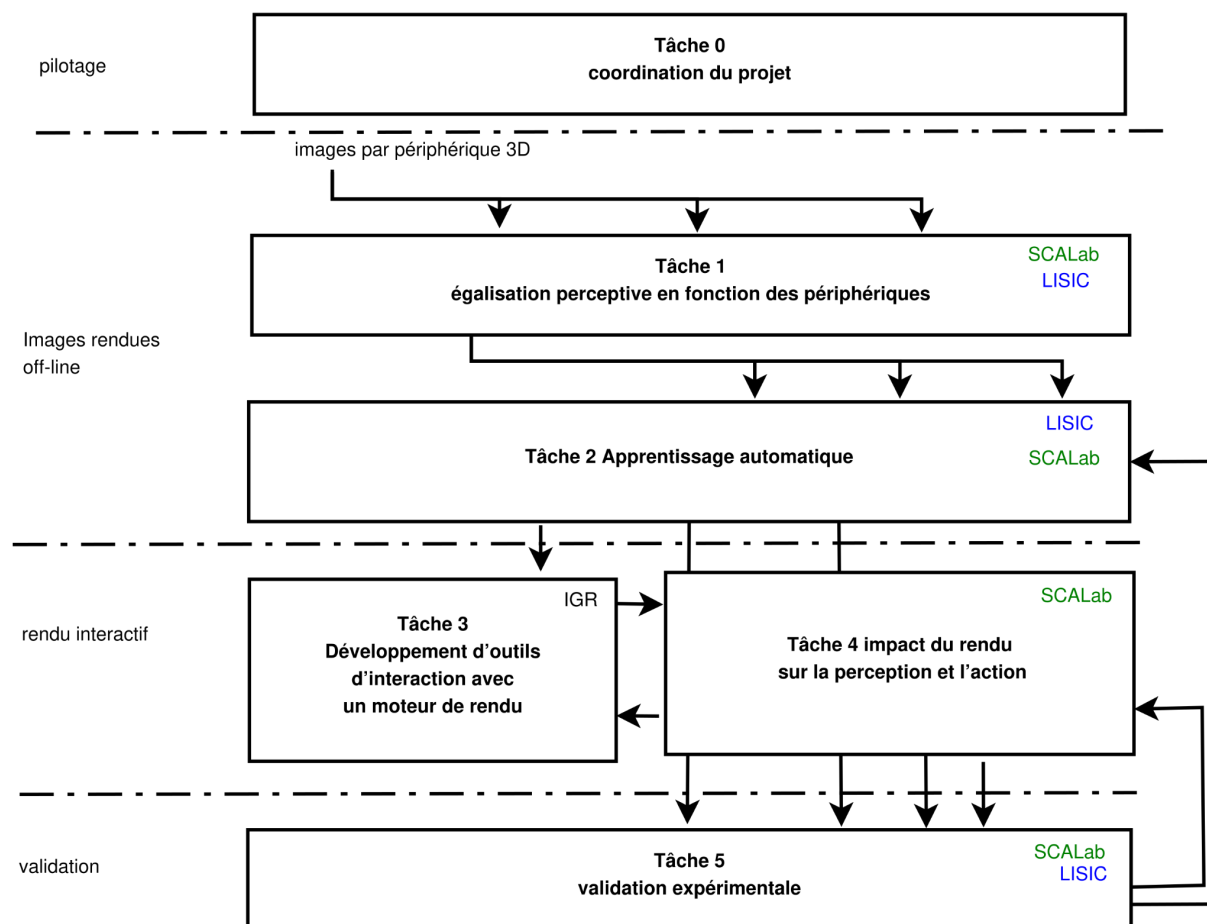


Figure 1: Les différentes tâches du projet PrISE-3D

C.4 RÉSULTATS OBTENUS

RÉSULTATS RELATIFS À UNE MEILLEURE MESURE DE LA PERCEPTION DU BRUIT

Les images photoréalistes générées par des algorithmes de rendu physique utilisant la méthode de Monte Carlo induisent la présence de bruit visuel qui diminue lorsque le temps de calcul augmente. La thèse de Vasiliki Myrodis avait pour but de mieux comprendre la perception humaine de ce bruit afin d'optimiser le temps de calcul sans perte détectable de qualité des images. Le concept de bruit dans des images pose certains défis méthodologiques car il a fallu adapter les paradigmes conventionnellement utilisés dans les tâches de recherche visuelle. Au cours d'une première série d'études, un niveau de bruit variable a été présenté dans une partie de la scène en utilisant la méthode adaptative Quest+. Le seuil perceptif à 50% a été obtenu à partir de l'estimation de la fonction psychométrique. Les mouvements oculaires des participants ont également été enregistrés pendant la tâche psychophysique afin de mieux décrire les paramètres influant la perception du bruit visuel. Dans une seconde tâche, les observateurs devaient détecter une différence de qualité en utilisant uniquement leur vision périphérique grâce à une procédure contingente à la position du regard. Les résultats de cette série d'études ont révélé que les participants utilisent principalement une zone contrainte de leur vision centrale, de l'ordre de 3 degrés d'angle visuel, pour la recherche de la qualité de l'image.

Les études en situation écologique de la perception de la qualité de l'image sont nécessaires pour permettre de comprendre la perception dans des conditions réelles. Une série d'études en ligne a été mise en place et nous avons collecté des données dans les deux conditions (laboratoire, en ligne). La comparaison des résultats a montré qu'il n'y a pas de différence significative entre les seuils mesurés dans ces différentes conditions. Pour ces études les deux groupes ont développé conjointement une suite logicielle permettant d'implémenter des méthodes psychophysiques adaptatives en ligne.

Enfin, nous nous sommes intéressés aux effets des scènes et des textures sur le seuil perceptif et les fixations. Ces recherches nous ont permis de démontrer que les zones non texturées et les plus claires sont les plus fixées et les plus utilisées pour déterminer la présence de bruit. Afin de prédire les fixations humaines nous avons proposé une nouvelle approche en calculant une carte de saillance sur la différence de deux images ayant des niveaux de bruit différents. Cette carte est un meilleur prédicteur que les cartes de saillances conventionnelles calculées sur une seule image pour la tâche de détection du bruit. L'ensemble de nos résultats, s'appuyant sur la perception visuelle humaine, a été mis à contribution pour améliorer les méthodes de rendu physique réalistes.

RÉSULTATS RELATIFS À L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE DU BRUIT

L'estimation de la qualité des images et de la perception du bruit reste un problème important dans diverses applications de traitement d'images. Elle est également devenue un sujet d'actualité dans le domaine de l'infographie photo-réaliste, où le bruit est inhérent au processus de calcul. Contrairement aux images de scènes réelles, il n'existe pas d'image de référence pour les images générées par ordinateur. Ainsi, les méthodes classiques pour évaluer la quantité de bruit et le critère d'arrêt pendant le processus de rendu ne sont pas utilisables. Ceci est particulièrement important dans le cas des méthodes d'illumination globale basées sur des techniques stochastiques : elles fournissent des images photo-réalistes qui sont toutefois corrompues par un bruit stochastique. Ce bruit peut être réduit en augmentant le nombre d'échantillons considérés (ici des chemins de lumière connectant caméra et sources lumineuses), comme le prouve la théorie de Monte Carlo. Le problème est cependant de trouver le bon nombre de chemins nécessaires pour que les observateurs humains ne puissent percevoir aucun bruit visuel. Jusqu'à présent, les caractéristiques participant à l'évaluation humaine de la qualité de l'image et du bruit restant perçu ne sont pas connues précisément. Il est alors difficile d'utiliser des méthodes d'apprentissage pour trouver automatiquement un critère d'arrêt.

Lors de nos travaux, une nouvelle méthode de caractérisation du bruit résiduel Monte-Carlo pour les images générées par ordinateur a été développée. Le bruit est représenté par l'entropie de la décomposition en valeurs singulières de chaque bloc de pixels composant une image. Ces valeurs d'entropie de la décomposition en valeurs singulières (SVD) sont ensuite utilisées comme entrée d'un modèle d'apprentissage à architecture de réseau neuronal récurrent, afin d'extraire le bruit de l'image et de prédire un seuil de convergence visuelle pour les différentes parties d'une image. Ainsi, une nouvelle évaluation de la qualité des images sans référence est proposée en utilisant la relation entre la SVD-Entropie et la qualité perceptive, basée sur une séquence d'images bruitées. Les expériences montrent que la méthode proposée, comparée à des scores psycho-visuels expérimentaux, dispose d'une bonne cohérence entre ces scores et les mesures de critères d'arrêt que nous obtenons.

Le choix des caractéristiques à extraire d'une image pour des tâches de classification est parfois difficile, surtout si les images sont liées à un type de bruit particulier. Dans une deuxième approche, une architecture de réseau de neurones nommée Guided-Generative Network (GGN) a été proposée pour extraire des informations précises permettant de quantifier correctement le bruit présent dans une fenêtre glissante d'images. Le GGN tend à trouver les caractéristiques souhaitées pour aborder un tel problème afin de sélectionner un critère de détection de ce bruit. Les résultats obtenus montrent que le GGN peut résoudre correctement le problème sans connaissance préalable du bruit, tout en étant compétitif avec les méthodes existantes.

RÉSULTATS RELATIFS AUX FIREFLIES

L'estimation de l'équation de rendu à l'aide des méthodes de Monte-Carlo produit des images photoréalistes en évaluant un grand nombre d'échantillons de l'équation de rendu par pixel. La valeur finale pour chaque pixel est alors calculée comme la moyenne de la contribution de chaque échantillon. La moyenne est un bon estimateur, mais pas nécessairement robuste, ce qui explique l'apparition de certains artefacts visuels tels que des pixels « lucioles » (ou *fireflies* en anglais), dus à l'apparition de valeurs aberrantes durant le processus de calcul (Zirr, 2018). Ceux-ci conduisent à une surestimation de la valeur de la moyenne. L'estimateur MoN (*Median of meaNs*) est un estimateur plus robuste que la moyenne, qui permet de réduire l'impact de ces valeurs aberrantes. Cependant, cette méthode converge plus lentement que la moyenne, ce qui réduit son intérêt pour les pixels dont la distribution ne contient pas de valeurs aberrantes. Pour surmonter ce problème, nous proposons une extension du MoN basée sur le coefficient de Gini. Celui-ci permet de mesurer l'hétérogénéité d'une distribution de valeurs et son utilisation dans notre problématique nous permet d'exploiter le meilleur des deux estimateurs (moyenne, MoN) lors du calcul. Cette approche est simple à mettre en œuvre quel que soit l'intégrateur et ne nécessite pas de paramétrage complexe. Enfin, elle présente un surcoût de calcul réduit et conduit à la disparition des pixels lucioles.

C.5 EXPLOITATION DES RÉSULTATS

Les approches basées sur le MoN, étudiées et validées dans le cadre de l'étude de l'apparition des fireflies, ont été intégrées au logiciel open-source Pbrt (Pharr et al. 2016), ce qui permet à la fois leur comparaison aux méthodes de la littérature et leur diffusion au sein de la communauté.

Les modèles de détection du bruit perceptif ont été développés de manière indépendante de tout moteur de rendu, mais seront prochainement intégrés à ce même moteur, afin de pouvoir être utilisés dans le cadre d'autres recherches et/ou en production.

C.6 DISCUSSION

Les deux premières tâches qui correspondaient à la méthodologie de recueil de données

psychométriques d'une part, et à l'apprentissage automatique appliqué au problème de détection du bruit, d'autre part, ont finalement occupé la plus grande part de la réalisation. Les résultats obtenus ont d'ailleurs fait l'objet de plusieurs publications et de mise à la disposition d'outils communs et de partage de données.

Une relative difficulté a été rencontrée sur la tâche 3 (développement d'un moteur de réalité mixte), liée au départ à une difficulté de recrutement d'un ingénieur de recherche. Son travail a néanmoins permis d'aboutir à une préversion d'un démonstrateur qui mériterait d'être finalisé, en particulier avec l'apparition de la version GPU du moteur de simulation d'éclairage utilisé dans le projet (Pbrt). Enfin la problématique sanitaire a rendu délicate son évaluation par des tests subjectifs, qui devaient être réalisés *in situ* avec des matériels spécifiques. Pour ces raisons, la tâche 4 n'a pas réellement abouti, mais nous disposons de suffisamment d'éléments pour poursuivre les développements dans ce domaine.

Enfin, il a été possible au fur et à mesure des développements de valider expérimentalement les résultats, comme cela avait été prévu dans la tâche 5.

C.7 CONCLUSIONS

La grande majorité des objectifs qui avaient été fixés dans ce projet ont été atteints et un problème annexe (*fireflies*), non prévu initialement, a pu également être traité durant nos travaux. Des procédures de récupération de seuils perceptifs ont été développées et deux approches à base d'apprentissage artificiel ont été proposées et évaluées avec succès pour la tâche de détection de bruit visuel. Une partie des validations expérimentales a été bloquée par la situation sanitaire, du fait de la difficulté à envisager des expérimentations *in situ*. Nous avons néanmoins pu contourner certains de ces blocages, en proposant et en développant des plateformes web permettant d'évaluer les principales données qui étaient nécessaires à nos travaux, à savoir les seuils de perception du bruit. Un prototype de rendu mixte a été développé, qui nécessitera une phase d'évaluation perceptive dans les mois qui viennent.

Les membres de PrISE-3D tiennent enfin à remercier l'ANR pour la confiance et le soutien financier qui leur ont été accordés, et qui leur ont permis d'approfondir le sujet principal du projet et de proposer des solutions originales et efficaces au problème de détection du bruit visuel généré par les méthodes de Monte carlo dans le cadre de simulations d'éclairage.

C.8 RÉFÉRENCES

- Kajiya, J. T. (1986). The rendering equation. SIGGRAPH '86 Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 143-150.
- Matt Pharr, Wenzel Jakob, and Greg Humphreys. 2016. Physically Based Rendering: From Theory to Implementation (3rd. ed.). Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA.
- Watson, A. B. (2017). QUEST+: A general multidimensional Bayesian adaptive psychometric method. Journal of Vision, 17(3), 10. <https://doi.org/10.1167/17.3.10>
- Zirr, T., Hanika, J. & Dachsbacher, C. (2018). Re-Weighting Firefly Samples for Improved Finite-Sample Monte Carlo Estimates. Computer Graphics Forum, 37.

D LISTE DES LIVRABLES

Date de livraison	N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires (souligner le responsable)	Commentaires
juin 2019	1	Démonstrateur de moteur de rendu mixte MiR-3D	prototype	<u>LISIC</u>	préversion
juin 2019	2	Plateforme d'expériences en ligne SIN-3D https://github.com/prise-3d/SIN3D	logiciel	<u>LISIC</u> , SCALab	
juin 2020		Package logiciel ipfml https://github.com/prise-3d/IPFML	logiciel	<u>LISIC</u>	
juin 2021		Python Behavioral OnLine Experiment framework https://github.com/prise-3d/PyBOLE	logiciel	<u>LISIC</u> , SCALab	

E IMPACT DU PROJET

E.1 INDICATEURS D'IMPACT

Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)

		Publications multipartenaires	Publications monopartenaires
International	Revue à comité de lecture	2	2
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		1
	Communications (conférence)		3
France	Revue à comité de lecture		
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)		
Actions de diffusion	Articles vulgarisation		
	Conférences vulgarisation		
	Autres		

Autres valorisations scientifiques (à détailler en E.3)

	Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)
Brevets internationaux obtenus	
Brevet internationaux en cours d'obtention	

Brevets nationaux obtenus	
Brevet nationaux en cours d'obtention	
Licences d'exploitation (obtention / cession)	
Créations d'entreprises ou essaimage	
Nouveaux projets collaboratifs	
Colloques scientifiques	
Autres (préciser)	

E.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Revue à comité de lecture

1. Myrodia, V., Delepoulle, S. & Madelain, L. (2020). Foveal and peripheral vision for assessing the quality of computer-generated images. Journal of Vision, 20 (11), 355. <https://doi.org/10.1167/jov.20.11.355>
2. Buisine, J., Bigand, A., Synave, R., Delepoulle, S. & Renaud, C. (2021). Stopping Criterion during Rendering of Computer-Generated Images Based on SVD-Entropy. Entropy. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03100109>
3. Buisine, J., Delepoulle, S. & Renaud, C. (2021b). Minimalist And Customisable Optimisation Package. Journal of Open Source Software, <https://doi.org/10.21105/joss.02812>
4. Myrodia, V., Buisine, J. & Madelain, L. (2021). Comparison of threshold measurements in laboratory and online studies using a Quest+ algorithm. Journal of Vision, 21 (9), 1959. <https://doi.org/10.1167/jov.21.9.1959>

Communications (conférences)

1. Buisine, J., Delepoulle, S. & Renaud, C. (2021a). Fireflies removing in Monte Carlo rendering with adaptive Median of means. Eurographics Symposium on Rendering (2021). <https://doi.org/10.2312/sr.20211296>
2. Buisine, J., Teytaud, F., Delepoulle, S. & Renaud, C. (2021). Guided-Generative Network for noise detection in Monte-Carlo rendering. International Conference On Machine Learning And Applications. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03374214>
3. Vasiliki Myrodia, Jérôme Buisine, Samuel Delepoulle, Christophe Renaud and Laurent Madelain (2021) Measured and predicted visual fixations in a Monte Carlo rendering noise detection task. ACM Symposium on Applied Perception, 16 - 17 September, 2021 (poster)

Autres

1. Buisine, J., Delepoulle, S., Synave, R. & Renaud, C. (2021). Subjective human thresholds over computer generated images. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.4531460>

2. Buisine, J., Teytaud, F., Delepoulle, S. & Renaud, C. (2022) Guided-Generative Network: A new robust deep learning architecture for noise characterization Deep Learning Applications (Springer, volume 4).

E.3 LISTE DES ÉLÉMENTS DE VALORISATION

La majeure partie des logiciels développés dans le cadre du projet sont librement accessibles sur la plateforme github, regroupés dans l'organisation PrISE-3D : <https://github.com/prise-3d>. L'ensemble est constitué de 54 dépôts comportant des logiciels majoritairement développés dans les langages python, C++ et JavaScript. Neuf contributeurs ont participé à ces dépôts.

On note deux présentations du projet dans des revues internes :

- Moins de bruit pour mieux voir, Empreinte, Le magazine de l'ULCO dédié à l'actualité de la recherche. N°2, été 2018
- Projet phare : PRISE-3D - Perception, Interactions et Simulation d'Éclairage 3D, Lettre de l'InSHS n°5 mai 2019

Le cadre du projet PrISE-3D a également permis la soutenance de deux thèses et d'une habilitation à diriger les recherches :

- La thèse de Jérôme BUISINE le 8 décembre 2021 : Méthodes d'apprentissage automatique pour la prise en compte du bruit dans les images de synthèse. Université du Littoral - Côte d'Opale ;
- la thèse de Vasiliki MYRODIA le 15 décembre 2021 : Études psychophysiques sur la perception visuelle du bruit de rendu de Monte Carlo. Université de Lille ;
- l'habilitation à diriger les recherches de Samuel DELEPOULLE le 17 juin 2022 : Entre perception et images numériques : une perspective. Université du Littoral - Côte d'Opale.

E.4 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTÉS EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Identification				Avant le recrutement sur le projet			Recrutement sur le projet				Après le projet				
Nom et prénom	Sexe H/F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs (ans)	Partenaire ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Durée missions (mois) (3)	Date de fin de mission sur le projet	Devenir professionnel (4)	Type d'employeur (5)	Type d'emploi (6)	Lien au projet ANR (7)	Valorisation expérience (8)
Jérôme BUISINE	H	jerome.buisine@univ-littoral.fr	juin 2022	Master	France	3	LISIC	Doctorant	35	31/08/2021	Maître de conférences	enseignement et recherche publique	enseignant-chercheur	oui	oui
Vasiliki MYRODIA	F	vmyrodia@gmail.com	juin 2022	Master	UE	3	SCALab	Doctorante	36	30/09/2021	Post-doc France	enseignement et recherche publique	chercheur	non	oui
Thomas BOUTE	H	thomas.l.boute@gmail.com	juin 2022	Maîtrise MIAGE	France	17	LISIC	ingénieur	24	31/08/2020	CDD	enseignement et recherche publique	Ingénieur de recherche	non	oui
Richard DROUARD	H	rdrouard@free.fr	juin 2022	Diplôme Ingénieur	France	25	SCALab	Ingénieur	5	23/06/2022	Recherche d'emploi				

Aide pour le remplissage

(1) **Adresse email** : indiquer une adresse email la plus pérenne possible

(2) **Poste dans le projet** : post-doc, doctorant, ingénieur ou niveau ingénieur, technicien, vacataire, autre (préciser)

(3) **Durée missions** : indiquer en mois la durée totale des missions (y compris celles non financées par l'ANR) effectuées sur le projet

(4) **Devenir professionnel** : CDI, CDD, chef d'entreprise, encore sur le projet, post-doc France, post-doc étranger, étudiant, recherche d'emploi, sans nouvelles

(5) **Type d'employeur** : enseignement et recherche publique, EPIC de recherche, grande entreprise, PME/TPE, création d'entreprise, autre public, autre privé, libéral, autre (préciser)

(6) **Type d'emploi** : ingénieur, chercheur, enseignant-chercheur, cadre, technicien, autre (préciser)

(7) **Lien au projet ANR** : préciser si l'employeur est ou non un partenaire du projet

(8) **Valorisation expérience** : préciser si le poste occupé valorise l'expérience acquise pendant le projet.

Les informations personnelles recueillies feront l'objet d'un traitement de données informatisées pour les seuls besoins de l'étude anonymisée sur le devenir professionnel des personnes recrutées sur les projets ANR. Elles ne feront l'objet d'aucune cession et seront conservées par l'ANR pendant une durée maximale de 5 ans après la fin du projet concerné. Conformément à la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 modifiée, relative à l'Informatique, aux Fichiers et aux Libertés, les personnes concernées disposent d'un droit d'accès, de rectification et de suppression des données personnelles les concernant. Les personnes concernées seront informées directement de ce droit lorsque leurs coordonnées sont renseignées. Elles peuvent exercer ce droit en s'adressant l'ANR (<http://www.agence-nationale-recherche.fr/Contact>).