

Mesure d'indice de service à grand rendement sur chaussées aéronautiques

Étude de faisabilité

Rapport d'étude



Relevés de dégradations à grand rendement sur chaussées aéronautiques

Etude de faisabilité – Novembre 2010

Les chaussées aéronautiques font l'objet d'un suivi périodique à l'aide de la méthode de l'Indice de Service. Cette méthode nécessite un relevé systématique des dégradations de surface, dont l'analyse permet de calculer les indices de service superficiels, structurels et globaux des chaussées. Ces relevés, qui actuellement sont exécutés par des opérateurs à pied, s'avèrent longs et extrêmement coûteux en ressources et peuvent de plus constituer une gêne pour l'exploitation de l'aérodrome. Afin d'améliorer le rendement des relevés d'indice de service et ainsi réduire voire supprimer la gêne causée à l'exploitation, le STAC a engagé une démarche en partenariat avec le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Rouen (CETE Normandie Centre) pour automatiser la méthode en s'appuyant sur des outils existants utilisés dans le domaine routier tant en France qu'à l'étranger. Le rapport présente les conclusions de l'étude de faisabilité et de l'expérimentation réalisées en 2009 et 2010.

High speed surface condition surveying for aircraft pavements

Feasibility Study – November 2010

Aircraft pavements are subject to periodic monitoring by using the method of the Service Index. This method requires a systematic survey of surface distress, whose analysis is used to calculate the superficial, structural and overall service indices of the pavements. These surveys, which are currently performed by operators on foot, prove long and extremely resource intensive and besides may cause disruption to the operation of the aerodrome.

To improve the performance of the service index surveys and reduce or eliminate the hindrance caused to the airport operations, the STAC has initiated an approach with the Regional Laboratory of Civil Engineering of Rouen (Normandy CETE Centre) to automatise the method based on existing high speed survey equipment used in the road sector in France and abroad.

The report presents the findings of the feasibility study and experimentation carried out in 2009 and 2010

RAPPORT

CETE
Normandie Centre

DERDI
Département
Expérimentation,
Recherche,
Développement et
Innovation
CECP
Centre d'Etudes et
de Construction de
Prototypes

Etude de faisabilité

Mesure d'Indice de Service à grand rendement sur chaussées aéronautiques

Novembre 2010

Ressources, territoires, habitats et logement
Énergie et climat
Développement durable
Prévention des risques
Infrastructures, transports et mer

**Présent
pour
l'avenir**



*Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, Du Développement durable et de la Mer
en charge des Technologies vertes et des Négociations sur le climat*

Historique des versions du document

Version	Auteur	Commentaires
1	Thibaut NOEL	

Affaire suivie par

Thibaut NOEL – Département Expérimentation, Recherche, Développement et Innovation / Centre d'Études et de Construction de Prototypes
<i>Tél. 02 35 68 82 87 / fax 02 35 68 81 44</i>
<i>Mél. Thibaut.Noel@developpement-durable.gouv.fr</i>
Nathalie CHARRIER – Département Expérimentation, Recherche, Développement et Innovation / Centre d'Études et de Construction de Prototypes
<i>Tél. 02 35 68 92 99 / fax 02 35 68 81 44</i>
<i>Mél. Nathalie.Charrier@developpement-durable.gouv.fr</i>
Guillaume VOISIN – Laboratoire Régional de Rouen / Groupe Infrastructures Durables
<i>Tél. 02 35 68 88 23 / fax 02 35 68 81 72</i>
<i>Mél. Guillaume.Voisin@developpement-durable.gouv.fr</i>

Participants :

Jean DUMOULIN – LCPC / Mesure, Auscultation, Calcul Scientifique
<i>Tél. 02 40 84 56 24 / fax 02 40 84 56 59 98</i>
<i>Mél. Jean.dumoulin@lcpc.fr</i>
Guillaume VRAC – LCPC / Mesure, Auscultation, Calcul Scientifique
<i>Jacques DESBARATS, Denis BAR, Christian BUSSIGNIES - SLI Evreux</i>

Référence Internet

<http://www.cete-normandie-centre.developpement-durable.gouv.fr>

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	7
I. ANALYSE DE L'EXISTANT.....	9
1. Véhicule Argus.....	9
2. Véhicule ARAN.....	10
3. Véhicule Mandli.....	11
II. VEILLE TECHNOLOGIQUE.....	13
1. Système d'imagerie de la chaussée.....	13
a) AIGLE RN.....	14
b) Caméra couleur de l'IRCAN.....	16
c) Capteur INO LCMS.....	17
d) Capteur INO LRIS.....	20
2. Guidage / localisation du véhicule.....	22
a) Solution Septentrio.....	23
b) Solution Magellan.....	24
c) Solution Trimble.....	25
III. ESSAIS DU CAPTEUR INO LCMS.....	27
1. Objectifs/méthodologie.....	27
2. Configuration du matériel.....	28
a) Véhicule porteur.....	28
b) Outils d'analyse.....	29
3. Préparation des essais.....	32
4. Déroulement des essais.....	34
IV. RESULTATS DES TESTS INO LCMS.....	35
1. Résultats sur section souple.....	35
a) Famille des déformations.....	35
b) Famille des fissures.....	37
c) Famille des arrachements.....	39
d) Autres.....	41
2. Résultats sur section rigide.....	43
a) Dégradations de structure.....	43
b) Dégradations de surface.....	45
c) Dégradations de joints.....	46
d) Autres.....	47
3. Conclusion.....	48

<u>V.</u>	<u>TESTS DE LA CAMERA COULEUR DE L'IRCAN.</u>	<u>49</u>
1.	Objectif.....	49
2.	Configuration du matériel.....	49
3.	Déroulement des essais.....	50
4.	Résultats.....	50
a)	Chaussées souples.....	50
b)	Chaussées rigides.....	51
5.	Utilisation de nuit.....	51
6.	Conclusion.....	52
<u>VI.</u>	<u>ESTIMATION DES PERFORMANCES METROLOGIQUES REQUISES.</u>	<u>53</u>
1.	Performances requises pour l'imagerie.....	53
2.	Performances requises pour le système de guidage.....	53
<u>VII.</u>	<u>SOLUTIONS ENVISAGEES, CONTRAINTES D'UTILISATION.</u>	<u>55</u>
1.	Comparaison des capteurs proposés.....	55
2.	Solutions envisagées.....	57
3.	Performances des solutions envisagées.....	64
4.	Système de guidage.....	67
5.	Logiciel d'exploitation.....	67
<u>VIII.</u>	<u>POSSIBILITE D'UN DEVELOPPEMENT COMMUN.</u>	<u>69</u>
1.	Evolution de l'AIGLE RN.....	69
2.	Considérations techniques.....	69
3.	Conclusion.....	70
<u>IX.</u>	<u>ESTIMATION DES COUTS ET DUREES.</u>	<u>71</u>
<u>X.</u>	<u>CONCLUSION.</u>	<u>79</u>

Introduction

Les chaussées aéronautiques font l'objet d'un suivi périodique de leurs états au travers d'une valeur numérique appelée Indice de Service. Cet indicateur est calculé à partir de relevés visuels de dégradations. Ces relevés sont actuellement réalisés en journée et peuvent perturber l'exploitation normale de la plate-forme.

Il est nécessaire de réfléchir à une méthodologie permettant d'effectuer ces relevés de façon à limiter voire supprimer la gêne à l'exploitation de l'aéroport.

Pour répondre à cette problématique et suite à la réunion de lancement du 10/02/2009, le STAC a décidé de confier au LRPC de Rouen, assisté par le CECR ROUEN une étude permettant de tester la faisabilité d'effectuer ce relevé à partir des outils utilisés dans le domaine routier, à savoir : l'Aigle RN et le matériel d'exploitation VISIODEC. Le groupe de travail a décidé de retenir deux sections test : une section rigide (la partie sud du taxiway nord appelé Bravo) et une section souple (la bretelle Echo) de la base aérienne 105 d'Évreux.

Ces sections ont fait l'objet de deux types de relevés les 27 et 28 mai 2009 :

- l'un par l'équipe du STAC suivant la méthode IS ;
- l'autre par l'AIGLE RN et le matériel d'exploitation VISIODEC.

Sur chaussées souples : Seuls cinq types de dégradations sur vingt-deux ont été testés, appartenant tous à la famille des fissures. L'étude révèle des difficultés de détection de ces dégradations, des niveaux de gravité erronés et des erreurs d'interprétation du type de dégradation. Selon les conclusions du rapport, l'Indice de Service global n'est dégradé que de 4 points, ce qui ne change pas le niveau de service de la piste.

Sur chaussées rigides : Sept types de dégradations sur dix ont été testés. L'AIGLE RN détecte moins de dégradations, avec là encore des niveaux de gravité erronés. Ainsi, l'IS est fortement augmenté, ce qui améliore le niveau de service de 2 classes.

Ces tests, incomplets car ne permettant pas de tester l'AIGLE RN sur les 32 types de dégradations recensées dans le catalogue du STAC, ont toutefois permis de relever trois problématiques principales :

- Les chaussées aéronautiques sont trop larges pour être numérisées en un seul passage. Il est donc nécessaire de quadriller les pistes. Il faut alors prévoir un système de guidage permettant de gérer au mieux le recouvrement des données ;
- L'imagerie 2D n'étant pas suffisante pour relever tous les types de dégradations, en particulier pour la famille des déformations, il est nécessaire de trouver une technologie permettant des relevés selon les trois dimensions afin de caractériser les dégradations, tant en type qu'en niveau de gravité, avec suffisamment de pertinence ;
- Le matériel d'exploitation VISIODEC étant conçu pour la route, son utilisation sur chaussées aéronautiques s'avère difficile. Il convient alors de prévoir un nouveau matériel d'exploitation dont l'ergonomie sera optimisée pour l'utilisation aéronautique.

En conclusion, ces tests ont montré que le développement d'un matériel spécifique aux chaussées aéronautiques est nécessaire. Ce rapport présente l'étude de faisabilité effectuée par le CECR de Rouen, avec la collaboration du LR de Rouen et du département MACS du LCPC, au cours de l'année 2010, concernant le développement d'un matériel dédié aux chaussées aéronautiques.

I. Analyse de l'existant.

Ce paragraphe liste les appareils opérationnels existants sur pistes aéroportuaires ou routes.

1. Véhicule Argus.

L'appareil *Argus* du groupe *TÜV Rheinland* est utilisé en particulier sur les aéroports de Luxembourg, de Nuremberg en Allemagne et de Salzburg en Autriche. Il permet une auscultation de l'état de la surface des pistes et taxiways à grand rendement, en s'appuyant sur :

- des caméras matricielles orthogonales à la chaussée, disposées à l'arrière du véhicule ;
- un appareil de mesure de l'uni transversal et de l'uni longitudinal, constitué d'une poutre à l'avant du véhicule supportant 38 profilomètres lasers. La précision globale du système donnée par le constructeur est de 1 millimètre, avec un taux d'échantillonnage de 25 kHz (soit un profil tous les millimètres à 90 km/h) ;
- des caméras d'environnement montées sur le toit du véhicule.

Ce véhicule utilise le matériel Schniering composé de caméras matricielles couplées à des stroboscopes. Ces équipements, déjà testés en 2009, ont montré une résolution insuffisante ainsi qu'une inefficacité de nuit. Ainsi, cet appareil ne semble pas convenir aux attentes du STAC pour le calcul de l'IS à grand rendement.



Le véhicule Argus : à l'avant, le profilomètre laser. A l'arrière, les caméras haute résolution.

2. Véhicule ARAN.

Le véhicule ARAN de l'entreprise canadienne Fugro Roadware est un appareil à grand rendement utilisé depuis le milieu des années 1980 pour inspecter les routes. Ce véhicule est utilisé maintenant dans plus de quinze pays dans le monde. Le véhicule ARAN peut disposer des matériels suivants :

- des capteurs INO LRIS, permettant une résolution de 1 millimètre en transversal, et 1 millimètre en longitudinal jusqu'à 100 km/h ;
- un appareil de mesure de profils longitudinaux multipoints laser ;
- un appareil de mesure des profils transversaux à ultrasons. Le profil est capturé sur 37 points, espacés de 10 centimètres (pour une longueur totale de 3,6 mètres), et d'une précision de 1 millimètre. Cet appareil permet de capturer un profil tous les deux mètres à la vitesse de 80 km/h.
- des capteurs INO LRMS, un appareil de mesure des profils en travers par système laser. Le profil est capturé sur 1280 points, espacés de 3 millimètres (pour une longueur totale de 4 mètres), et d'une précision de 1 millimètre. Cet appareil permet de capturer un profil tous les 15 centimètres à la vitesse de 80 km/h.

Même si les capteurs INO LRIS semblent convenir aux besoins de l'imagerie, les moyens proposés pour acquérir les profils transversaux ne sont pas suffisants pour répondre à la demande du STAC.

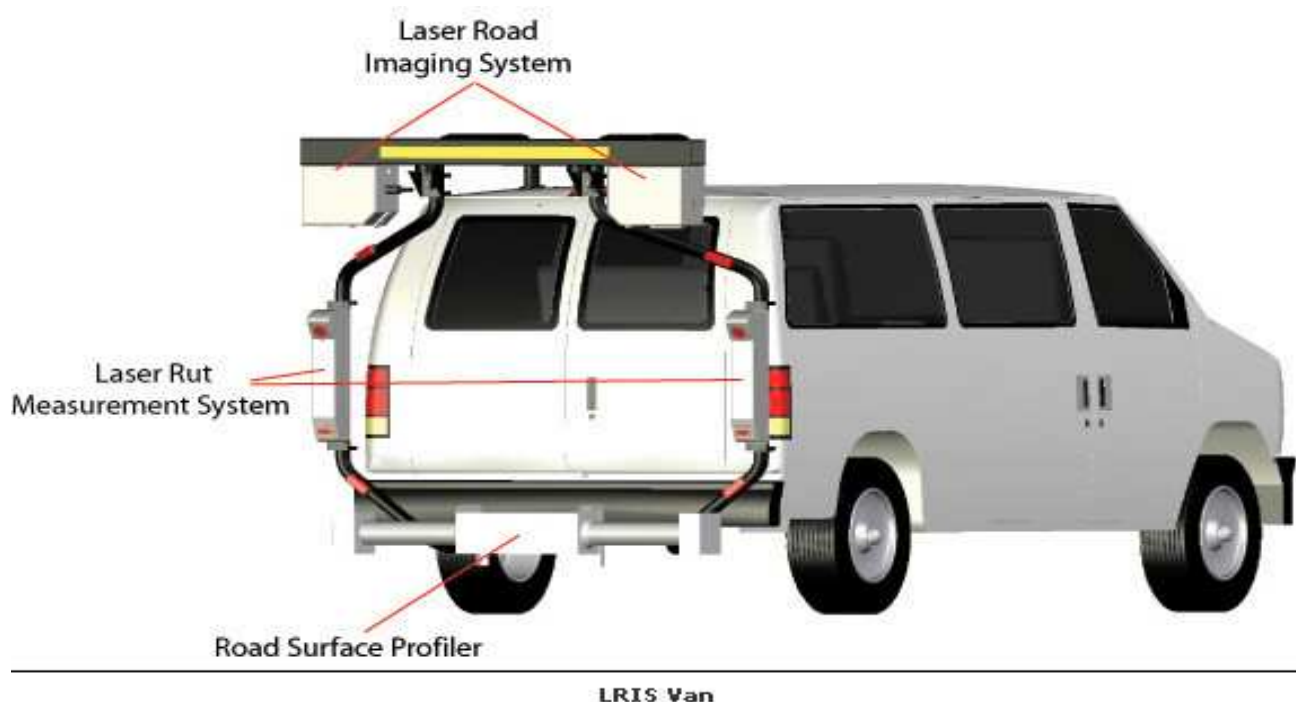


Véhicule ARAN.

3. Véhicule Mandli.

Mandli Communications Inc, une entreprise américaine basée dans le Wisconsin, propose une auscultation à grand rendement, en utilisant :

- un *Système Laser de l'Imagerie des Routes LRIS* développé par *INO*. Ce système d'imagerie laser linéaire donne une résolution allant jusqu'à 0,5 mm en transversal, avec un taux d'échantillonnage de 28 kHz (résolution longitudinale de 1 mm à 100 km/h) ;
- Un *Système Laser de Mesure d'Ornières LRMS* également développé par *INO* mesurant les profils transversaux. La résolution en profondeur est de 1 millimètre, pour un taux d'échantillonnage de 150 profils par seconde. Ce taux est largement insuffisant pour les besoins de l'IS à grand rendement ;
- un profilomètre.



Le véhicule *Mandli* et ses 3 équipements.

Les capteurs *INO* utilisés sur ce véhicule permettent des mesures de nuit. Seulement, l'entreprise *Mandli* n'ayant pas répondu à nos sollicitations, nous ne connaissons pas les caractéristiques du profilomètre. Il est donc difficile de donner une appréciation sur ce véhicule et ses utilisations antérieures sur chaussées aéroportuaires.

L'analyse de l'existant n'a pas montré de véhicule permettant de prendre en compte toutes les demandes du STAC. Cependant, des capteurs pouvant être intégrés sur un véhicule pourraient permettre d'effectuer un relevé d'IS à grand rendement.

II. Veille technologique.

La veille technologique a porté sur deux points correspondant aux deux problématiques soulevées lors des tests de l'*AIGLE RN* sur la base 105 d'Évreux :

- la recherche d'une solution d'imagerie capable de fournir une appréciation convenable des dégradations des pistes et taxiways.

- la nécessité d'une localisation et d'un guidage précis du véhicule pour gérer le quadrillage de la piste et le recouvrement des données.

Nous nous intéressons aux solutions existantes pouvant être intégrées sur le futur véhicule de relevés d'IS.

1. Système d'imagerie de la chaussée.

La solution la plus pertinente au relevé des dégradations, y compris les déformations de la chaussée, semble être l'utilisation d'un profilomètre laser, permettant l'acquisition à fréquence élevée de profils transversaux. Deux solutions s'offrent alors à nous :

- utiliser un système couplant imagerie 2D et profil 3D, tel que la tête *INO LCMS*, décrite plus loin dans ce document. La veille technologique effectuée n'a pas montré de concurrent direct au système *INO LCMS* ;
- utiliser un système d'imagerie 2D indépendant du profilomètre laser. Cette solution demande donc l'intégration de deux capteurs différents. Ainsi, on peut envisager d'utiliser pour le système d'imagerie 2D :
 - des caméras situées à l'arrière d'un véhicule, perpendiculaires à la route, couplées à un système de stroboscopes ;
 - des caméras situées à l'avant d'un véhicule, inclinées vers la chaussée, donnant un angle de vision proche de celui du releveur.
 - Des caméras linéaires éclairées par ligne laser.

L'utilisation d'une méthode de stéréoscopie (reproduction du relief à partir de deux images planes) a été envisagée, mais cette méthode n'est aujourd'hui pas assez avancée pour être installée sur un véhicule opérationnel.

a) AIGLE RN.

L'*AIGLE RN*, ou *Appareil d'Inspection GLobale de l'Etat du Réseau National*, dont le développement a été mené conjointement par les CECP d'Angers et de Rouen, nous servira de référence pour cette étude de faisabilité. Ce matériel mlpc® embarque des caméras numériques à acquisition noir et blanc *Schniering* permettant de photographier des plans de un mètre pour une longueur transversale de près de quatre mètres. La résolution des plans obtenus est de deux millimètres. Le logiciel *VISIODEC* permet la visualisation des images pour saisie des dégradations.

L'*AIGLE RN* a montré des résultats satisfaisants pour les relevés sur chaussées souples, mais est inadapté pour les relevés sur chaussées rigides.

Avantages :

- maîtrise de l'éclairage (acquisition diurne);
- vitesse de 90 km/h ;
- base existante adaptable.

Inconvénients :

- difficulté de différencier les fissures et le faïençage ;
- difficulté à caractériser l'état des joints ;
- problème de caractérisation de la végétation ;
- problème d'éblouissement sur dalles bétons ;
- éclairage perfectible pour un relevé nocturne ;
- impossibilité de relevés de profils transversaux.



L'AIGLE RN en test sur les pistes de la base 105.

Performances :

	AIGLE RN
Largeur de prise de vue	4 m
Résolution transversale	2 mm
Résolution longitudinale	2 mm

Pour plus d'informations sur les essais effectués sur la base 105 d'Evreux, on pourra se reporter au rapport intitulé « Automatisation du relevé de l'Indice de Service des chaussées aéronautiques – Faisabilité » de mars 2010, écrit par Guillaume Voisin du Laboratoire Régional de Rouen et Thierry LEMOINE du STAC (affaire n° 12 553).

b) Caméra couleur de l'IRCAN.

L'IRCAN, ou *Imagerie Routière par Caméra Numérique*, est un appareil à grand rendement utilisant des caméras haute résolution couleur pour filmer l'environnement de la route. Par conséquent, il ne filme pas directement la chaussée. Cependant, l'imagerie en couleur peut être un atout pour la caractérisation des dégradations.

L'IRCAN est équipé d'une caméra couleur haute résolution *PIKE F-210C* (1920*1080 pixels), d'une fréquence de 30 images par seconde. Ces caméras ne donnent pas d'information sur le profil transversal de la chaussée.

C'est un matériel mlpc® dont le développement a été réalisé par le CECF d'Angers.

Avantages :

- photographie couleur ;
- angle de vue proche de celui du releveur ;
- prix.

Inconvénients :

- aucune maîtrise de l'éclairage ;
- les déformations ne sont pas visibles ;
- estimation de la taille des dégradations moins précise.



Le véhicule IRCAN.

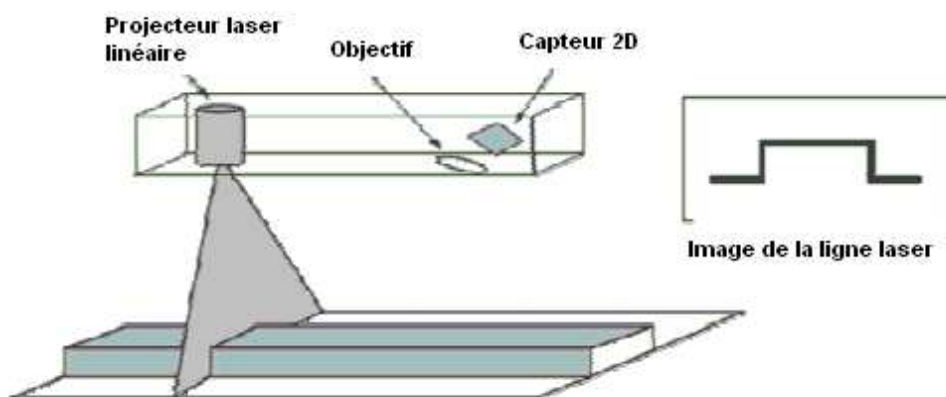
c) Capteur INO LCMS.

L'INO est une entreprise canadienne de conception et de développement, spécialisée en solutions optiques. Elle propose des solutions innovantes, notamment dans le domaine de l'imagerie de chaussée. Dans le cadre de cette étude, deux technologies sont décrites : le capteur 3D LCMS et le capteur 2D LRIS. La première de ces technologies, nommée LCMS pour *Laser Crack Measurement System*, allie caméra pour l'imagerie 2D en haute résolution, et projecteur laser pour le profil 3D. La seconde technologie sera présentée dans le paragraphe suivant.



Illustration du système INO LCMS.

Ces deux solutions utilisent la méthode de triangulation laser pour obtenir des profils de la chaussée. Un laser linéaire est projeté sur la surface de la chaussée. La ligne projetée est visualisée par une caméra, et les coordonnées des points sont alors calculées par triangulation.



Principe de triangulation laser.

En alignant ensuite les profils obtenus, on obtient un nuage de points représentant la forme de la surface de l'objet.

Le LCPC, et plus spécialement Jean Dumoulin, Chargé de Recherche au département *Mesure, Auscultation, Calcul scientifique*, travaille en collaboration avec *INO* et son licencié *Pavemetrics* sur le calcul des macro-textures à partir des données 3D de l'appareil *LCMS*, ainsi que sur des outils d'analyse des données.

L'*INO* poursuit le développement de son matériel et y apporte des modifications augmentant ses performances. Ainsi, le LCPC a fait l'acquisition d'une tête *LCMS* en 2007, mais une nouvelle version a vu le jour fin 2009. Celle-ci propose une technologie différente pour la tête de mesure : l'augmentation des performances de la caméra a permis l'abandon de l'obturateur à cristaux liquides. Cette amélioration permet un taux d'acquisition quadruplé et une meilleure qualité d'image. De plus, l'acquisition se fait maintenant à fréquence spatiale fixe (contrairement à une fréquence temporelle fixe en version 2007), ce qui garantit un écart constant entre chaque profil. Il est à noter que l'amélioration du processus de numérisation des images permet de réduire l'effet de peignage constaté sur les relevés avec la tête version 2007.

Les essais ont donc été réalisés avec la tête *LCMS* version 2007 et la visionneuse 3D sortie en 2009 a dû être adaptée par *INO* à la demande de Jean Dumoulin pour utilisation dans le cadre de cette étude de faisabilité.

Le capteur version 2010 répond aux critères originellement demandés par le STAC, à savoir une résolution de 1 mm en longitudinal et transversal, et 0,5 mm en profondeur. Cette résolution transversale peut s'obtenir à une vitesse de 20 km/h. Il est possible d'aligner 4 capteurs pour disposer d'une prise de vue de 8 mètres, suffisante pour numériser une dalle béton complète. Enfin, l'acquisition peut s'effectuer de nuit de manière à moins pénaliser l'utilisation des chaussées aéronautiques.

Avantages :

- imagerie et profil transversal ;
- fonctionne de jour comme de nuit ;
- performances testées et connues.

Inconvénients :

- vitesse de 20 km/h ;
- pas de couleur.



Les capteurs *INO LCMS* version 2010.

Performances (données constructeurs) :

	2007 (version testée)	2010
Largeur de prise de vue	2 m (un capteur)	2 m (un capteur)
Résolution transversale	1 mm	1 mm
Fréquence d'acquisition	1440 profils / seconde	5600 profils / seconde
Résolution longitudinale	1 mm à 5 km/h	1 mm à 20 km/h
Incertitude en profondeur	0,5 mm	0,5 mm
Plage des profondeurs	640 mm	250 mm
Hauteur nominale	2060 mm < h < 2260 mm	2200 mm
Vitesse d'acquisition maximale	100 km/h	100 km/h
Dimensions	527*296*142	428*265*139
Poids	20 kg	10 kg
Consommation électrique	150W à 120/220 VAC	150w à 120/220 VAC

d) Capteur INO LRIS.

Le *Système Laser de l'Imagerie des Routes (LRIS)* toujours de l'entreprise *INO* est composé d'une caméra linéaire haute définition et d'un faisceau laser servant à l'éclairage de la chaussée. L'utilisation du laser et l'angle de prise de vue procurent ici une amélioration du contraste et de la visibilité des fissures. Seulement, le faisceau n'est pas utilisé pour obtenir un profil vertical de la route.



Illustration du capteur *INO LRIS*.

Il existe deux versions de ce système, se différenciant par la résolution transversale. *INO* annonce une résolution transversale maximale de 0,5 millimètres, et un taux d'échantillonnage de 28 kHz, ce qui permet une résolution longitudinale de 1 millimètre à la vitesse de 100 km/h.

Ce capteur a été testé il y a 5 ans lors du développement de l'AIGLE RN. Les résultats étaient convaincants, notamment en ce qui concerne les fissures et faïençages, mais le système proposé par *Schniering* lui a été préféré, car l'*INO LRIS* ne permettait pas de détecter les dégradations de surface de type arrachement ou ressuage.

Avantages :

- très bonne résolution annoncée ;
- fonctionne de jour comme de nuit ;
- fréquence d'acquisition élevée (utilisable à 90 km/h).

Inconvénients :

- pas de profil de la chaussée ;
- pas de couleur.

Performances (données constructeurs) :

	LRIS
Largeur de prise de vue	3,95 m (2 capteurs)
Résolution transversale	1 mm ou 0,5 mm
Fréquence d'acquisition	28 000 profils / seconde
Résolution longitudinale	1 mm à 100 km/h
Hauteur nominale	1,9 m
Vitesse d'acquisition maximale	100 km/h

Dimensions	300*375*150
Poids	15 kg
Consommation électrique	250 W

2. Guidage / localisation du véhicule.

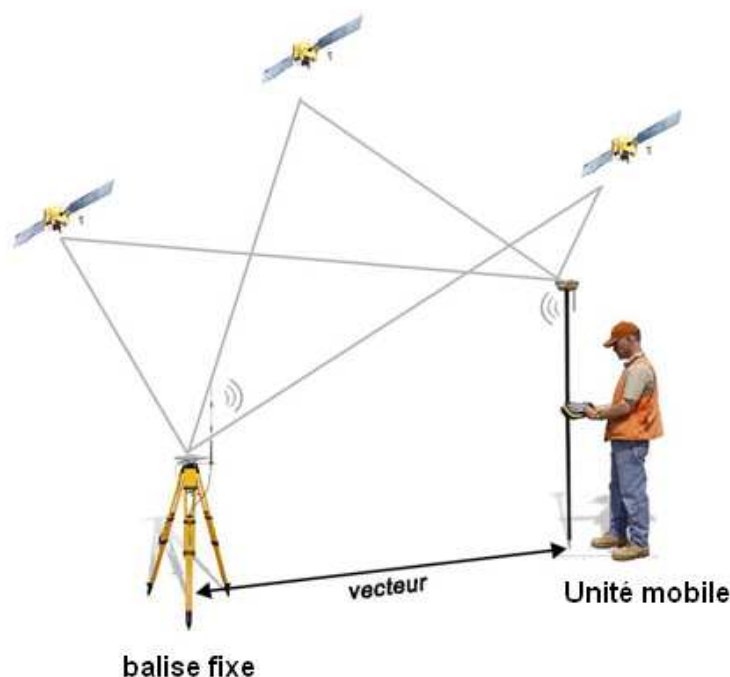
Les spécificités des pistes aéronautiques et des taxiways, avec des largeurs de pistes et des zones non linéaires, posent le problème du recollement des images de dégradations ainsi que leurs localisations précises. De plus, l'absence de points de repère, tels que les PR dans le domaine routier, ne permet pas d'envisager la localisation.

Compte tenu de ces spécificités, la localisation doit alors permettre de :

- guider le véhicule de manière à quadriller les pistes et les taxiways en limitant le recouvrement des données ;
- permettre lors du traitement des données, de reconstituer la piste en recollant précisément les images recueillies.

Notre recherche s'est intéressée aux solutions GPS centimétriques. Pour atteindre cette précision, ce sont des GPS dits différentiels de type RTK (Real Time Kinematic) qui doivent être utilisés. En effet, les corrections différentielles obtenues via un satellite EGNOS/WAAS (+/-15 à 20 cm) ou avec un abonnement à un service commercial type Omnistar (+/-5 à 10 cm) ne sont pas suffisantes pour atteindre une précision centimétrique.

Les GPS différentiels de type RTK utilisent une balise fixe au sol qui transmet les corrections par liaison radio ; on obtient une précision de $\pm 2,5$ cm. Il est à noter que les précisions annoncées sont obtenues dans des conditions de réception optimale et en statique. Un autre avantage de la technologie RTK est la répétabilité des mesures, ce qui permet de retourner exactement à la même position d'une année n à une année $n+1$ (non garanti avec les autres technologies). L'inconvénient de ce type de technologie est la portée des balises fixes (environ 10 km) ; toutefois, cette courte portée devrait être suffisante pour une utilisation sur les pistes et taxiways.



Utilisation d'une balise fixe pour la position GPS RTK.

Pour mettre en œuvre ce type de GPS, il faut une balise fixe, qui sert de point de référence, et une partie mobile constituée d'une antenne et d'un récepteur. Trois fournisseurs potentiels ont été retenus pour ces systèmes GPS.

a) Solution Septentrio.

Septentrio Satellite Navigation NV est une entreprise belge proposant plusieurs solutions d'antennes et de récepteurs GPS. Les performances annoncées par le constructeur sont les meilleures des trois solutions proposées, en terme de temps de mise en route et de temps d'acquisition des informations satellitaires.

La solution est composée principalement de :

Station fixe :

- Récepteur GPS AsteRx2e HDC avec option RTK pour balise fixe
- Antenne GPS bi-fréquence haute performance PolaNt*
- Trépied de chantier lourd

Unité mobile :

- Récepteur GPS AsteRx2e HDC avec option RTK pour unité mobile
- Antenne GPS bi-fréquence haute performance PolaNt*

Performances (données constructeurs, en statique) :

	Solution Septentrio
Précision horizontale	1 cm + 1 ppm
Précision verticale	2 cm + 1 ppm
Taux de rafraichissement	10 à 25 Hz
Coût équipement complet	23 501 euros TTC

b) Solution Magellan.

La société *Ashtech*, propose des GPS RTK nommés *Magellan*. Les performances annoncées sont équivalentes. La solution se compose de :

Station fixe :

- Récepteur GPS ProFlex 500 station de base
- Antenne GPS GNSS Survey Antenna MAG111406

Unité mobile :

- Récepteur GPS ProFlex 500
- Antenne GPS GNSS Survey Antenna MAG111406

Performances (données constructeurs, en statique) :

	Solution Magellan
Précision horizontale	1 cm + 1 ppm
Précision verticale	2 cm + 1 ppm
Taux de rafraichissement	20 Hz
Coût équipement complet	26 641 euros TTC

c) Solution Trimble.

Trimble est une entreprise américaine leader des solutions de localisation. Le matériel proposé est moins performant que ses concurrents concernant les temps d'acquisition du signal. Toutefois, cela n'est pas gênant car il sera nécessaire de respecter un temps de mise en route du véhicule instrumenté (initialisation des capteurs) qui sera supérieur au temps de démarrage du GPS.

La solution *Trimble* se compose de :

Station fixe :

- AGGPS 450 RTK base mobile radio intégrée, Trépied

Unité mobile :

- Récepteur AgGPS 432 Rover
- Antenne AgGPS 252 Smart Antenna

Performances (données constructeurs, en statique) :

	Solution Trimble
Précision horizontale	1 cm
Précision verticale	2 cm + 1 ppm
Taux de rafraichissement	10 Hz
Coût équipement complet (hors options)	27 603 euros TTC

L'avantage de la solution *Trimble* est qu'elle propose des options de guidage en plus de la simple fourniture de l'ensemble {récepteur + balise}. Un logiciel de préparation au bureau de son itinéraire existe ainsi qu'une visualisation sur écran dans le véhicule avec affichage de la trajectoire et identification des zones déjà parcourues. Toutefois, ces deux outils logiciels ont été développés pour des applications agricoles et peuvent être incomplets ou pas complètement adaptés à la problématique aéronautique. De plus, Il existe un dispositif de guidage automatisé, appelé *EZ-Steer*, permettant au véhicule de suivre un trajet prédéfini ; ce dispositif se positionne au niveau du volant (moyennant une adaptation mécanique du véhicule).



Le système EZ-Steer monté sur le volant.



Exemple de système de guidage (utilisé en agriculture).

III. Essais du capteur INO LCMS.

1. Objectifs/méthodologie

Lors de tests effectués sur la base 105 à Evreux, nous avons pu tester les performances de la tête *INO LCMS (Laser Crack Measurement System)*, dans sa version 2007, sur les dégradations de la piste et de ses taxiways. Ce système a été intégré par le CECF de Rouen en 2008 sur l'outil de recherche APO *VIRESTIM* du LCPC ; les mesures effectuées sont également géolocalisées via un récepteur GPS.

A partir de dégradations connues et identifiées, nous avons essayé de répondre aux deux questions suivantes :

- Peut-on déceler la présence d'une dégradation à partir des images collectées par le capteur *INO LCMS* ?
- Le cas échéant, peut-on caractériser le type et le niveau de gravité de la dégradation ?



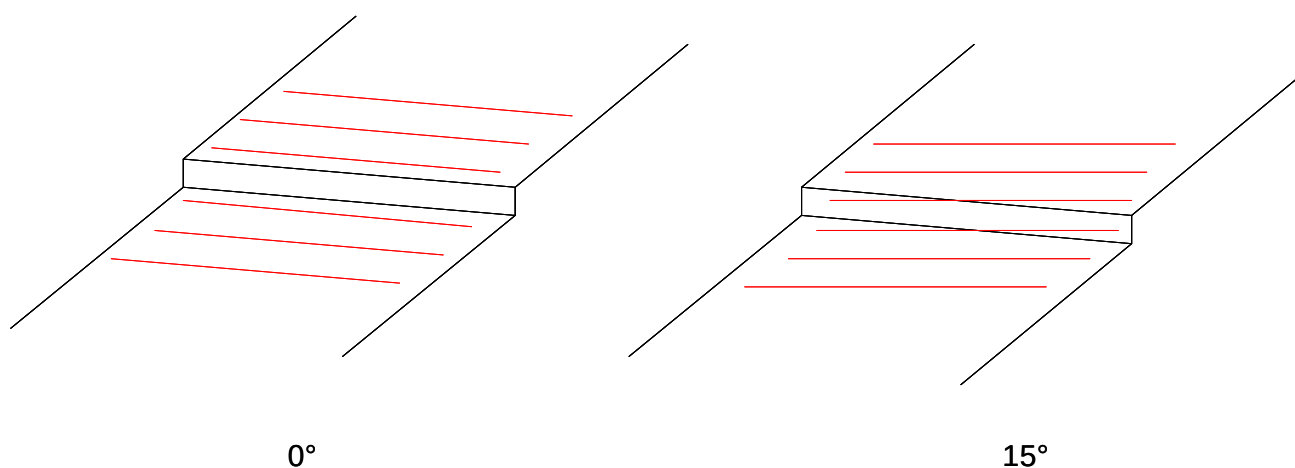
Essais à bord du *VIRESTIM*.

2. Configuration du matériel.

a) Véhicule porteur.

Le *VIRESTIM*, ou *Véhicule Instrumenté de Recherche pour la conduite d'Expérimentations en auscultation de Surface de chaussées par Techniques d'Imagerie*, est une station d'accueil pour différents systèmes d'imagerie, permettant d'acquérir et de sauvegarder les images de la surface des chaussées avec leurs abscisses curvilignes.

Le capteur *INO* de type *LCMS (Laser Crack Measurement System)*, version 2007, a été installé dans le caisson du *VIRESTIM*, avec une inclinaison de 15 degrés par rapport à la direction longitudinale du véhicule. Cette inclinaison permet d'obtenir une information plus complète sur la zone auscultée, en évitant notamment les pertes dans le sens transversal, dues au pas de mesure du capteur.



Exemple d'une marche

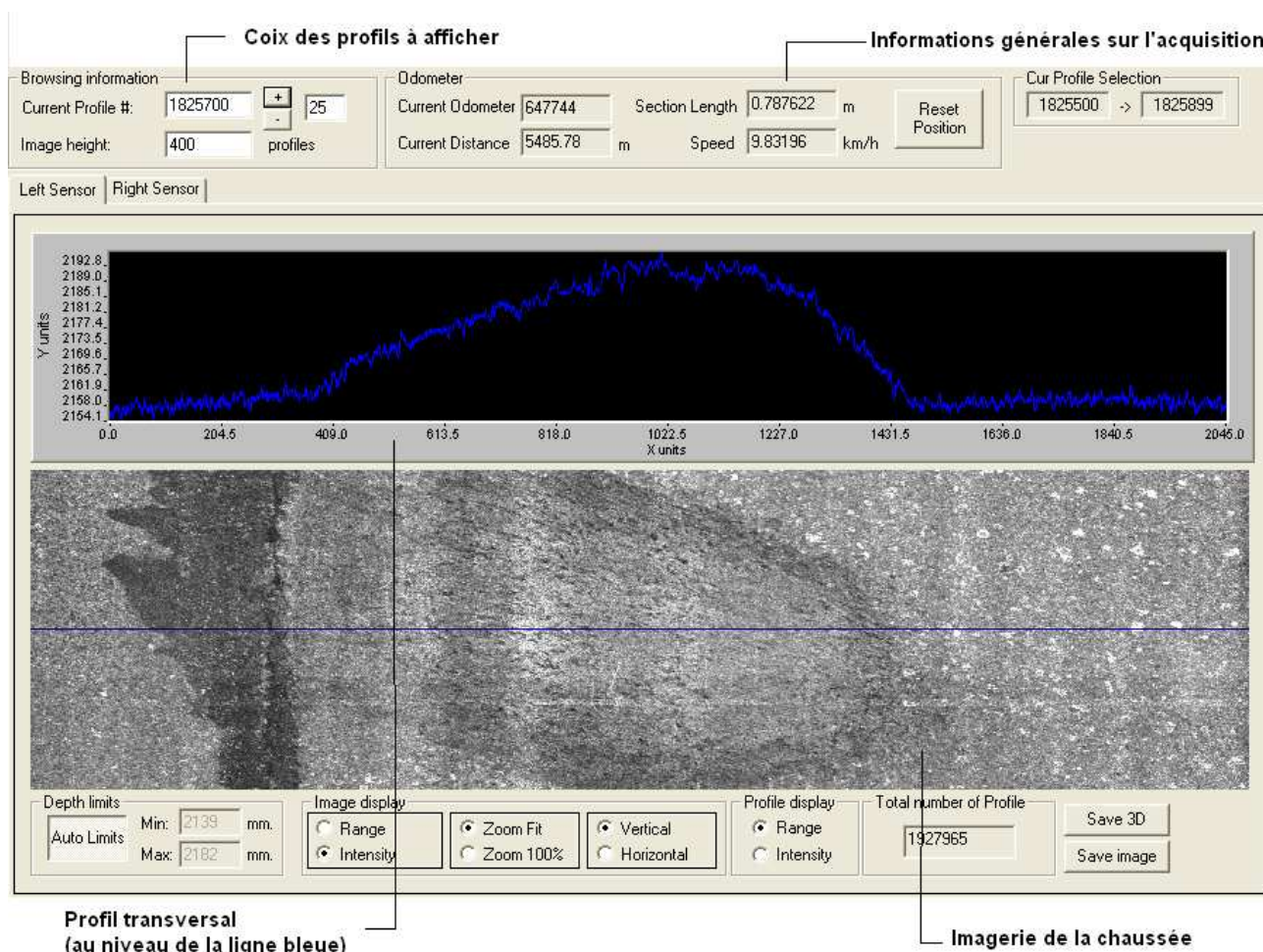
Enfin, il faut bien noter que le capteur *INO* à notre disposition date de 2007. Depuis, une nouvelle version est commercialisée, présentant des améliorations au niveau de l'optique de la caméra, une fréquence d'acquisition plus élevée, un pas réglable en spatial plutôt qu'en temporel et une numérisation plus performante.

b) Outils d'analyse.

Pour analyser les données recueillies à l'aide du capteur *INO LCMS*, le CECPC disposait de deux logiciels développés par *INO*, auxquels s'est ajouté un logiciel développé par l'équipe de Jean Dumoulin du LCPC au début du mois de septembre.

Le premier, la visionneuse 2D (crackreader 2), permet de visualiser les données sur deux écrans :

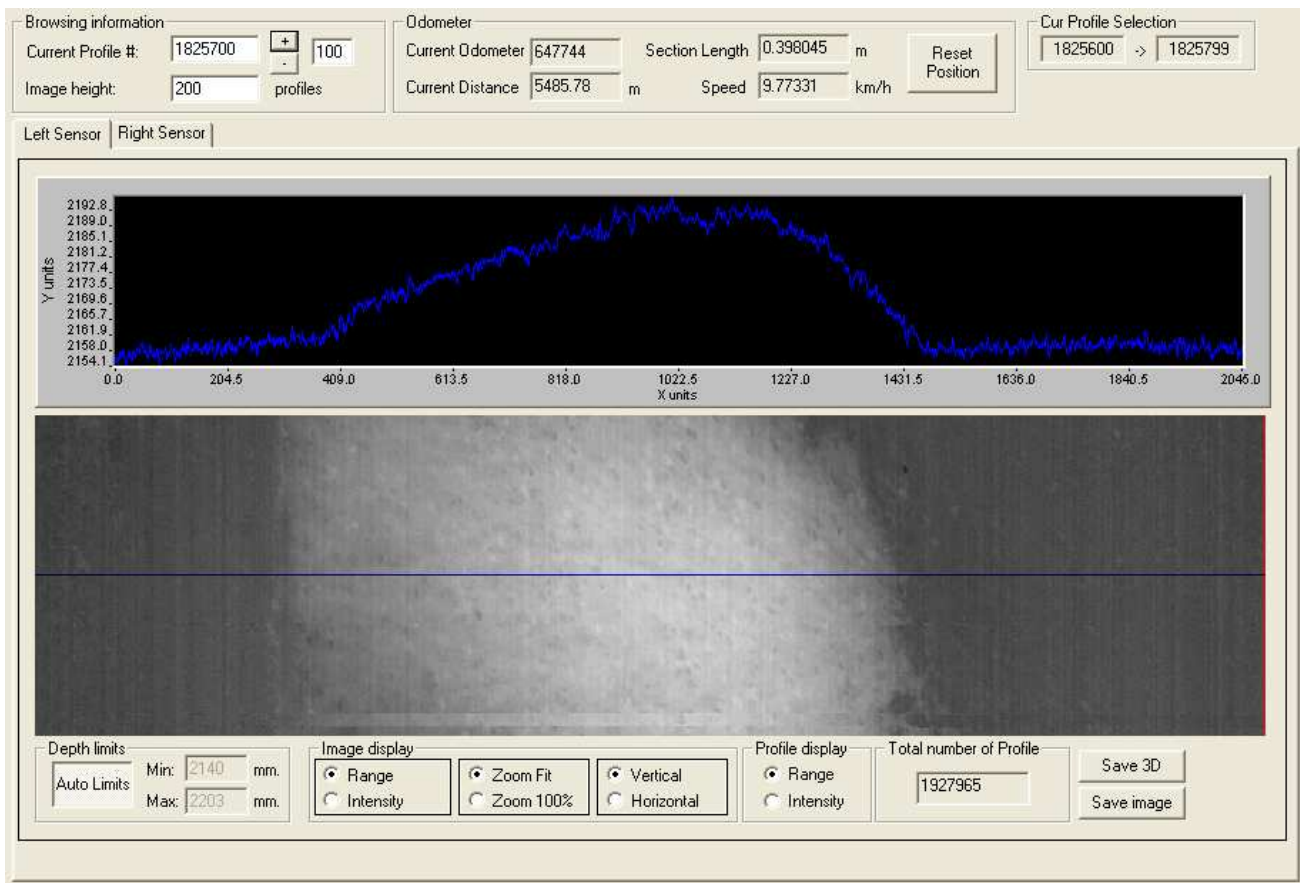
- l'un permet d'avoir l'image en 2D de la chaussée ;
- l'autre permet de visualiser la variation de l'altitude au niveau du profil transversal sélectionné (le profil est matérialisé au niveau de l'image 2D par la ligne bleue) : le profil représente la distance (en millimètres) du capteur au sol ; l'échelle des ordonnées du graphe étant croissante, ceci a pour effet d'inverser la visualisation logique des hauteurs. Ainsi, l'élévation dans le profil représenté ci-dessous correspond à une brûlure dans la chaussée.



La visionneuse 2D : on note les 2 fenêtres de visualisation.

Ce logiciel offre quatre options :

- le choix des profils à afficher et du pas d'avancement ;
- une fonction de zoom sur la partie imagerie de chaussée ;
- Un affichage des profils dans le sens vertical (pour un véhicule roulant du haut vers le bas), donnant une vue zoomée sur les dégradations, ou dans le sens horizontal (le véhicule roule de la gauche vers la droite), qui permet d'avoir une vue d'ensemble en affichant un plus grand nombre de profils.
- une imagerie de la chaussée en carte d'altitude. Cette option permet de repérer plus facilement les irrégularités d'élévation. Elle permet notamment de faire ressortir les fissures, marches et départs de matériaux. Dans le cas des fissures, elle est particulièrement utile sur chaussées souples, mais moins sur chaussées rigides où les fissures légères sont moins profondes.



La même dégradation vue grâce à la carte d'altitude. La brûlure ressort fortement.

Même si ce logiciel comporte des défauts d'ergonomie gênants (profil vertical inversé et non alignement de l'image et de son profil), il permet toutefois le repérage des dégradations ainsi que la caractérisation de celle-ci. De plus, la carte d'altitude est un réel atout pour faire ressortir les défauts de la chaussée. Cependant, cette carte d'altitude est plus difficile à utiliser lorsque les variations d'altitude sont importantes, car les dégradations recherchées sont alors gommées à l'affichage. On remarque aussi un léger peignage sur l'imagerie 2D dû à la numérisation. Ce défaut ne s'avère pas gênant pour traiter les données recueillies.

Il constitue ainsi une bonne base d'analyse dans le cadre de cette étude de faisabilité.

Le deuxième logiciel, la visionneuse 3D (*LCMS data viewer 3D*), permet de reconstituer l'image de la route sur un profil 3D, et de le faire ensuite évoluer dans un espace à trois dimensions. Il paraît peu pratique pour le repérage de dégradations (pas de défilement des profils suivant l'abscisse curviligne), mais se révèle efficace pour leur caractérisation, notamment en regardant la dégradation sous un autre angle. Généralement, les fissures ressortent mieux avec ce logiciel qu'avec l'imagerie 2D proposée par le logiciel précédent. On note là aussi un effet de peignage sur l'image.

L'ergonomie des commandes rend toutefois son utilisation compliquée.



Exemple de résultat en vue 3D : on distingue un défaut de joint entre 2 dalles, une marche et une réparation sur le coin d'une dalle.

Enfin, l'équipe de Jean Dumoulin du LCPC de Nantes a développé un logiciel reprenant les fonctions d'imagerie 2D, de visualisation du profil sélectionné, de carte d'altitude et de vision fusion 3D. A ceci, il ajoute des fonctionnalités intéressantes améliorant grandement l'ergonomie. On note ainsi les possibilités :

- d'enregistrer les dégradations dans un fichier xml et d'y retourner facilement ;
- d'inverser le profil sélectionné ;
- de changer les couleurs de la palette graphique utilisée dans la carte d'altitude ;
- de zoomer sur le profil sélectionné pour faciliter la mesure ;
- de disposer des 3 vues en même temps : 2D, carte d'altitude, et vue fusionnée ;
- de géolocaliser les dégradations repérées sur une cartographie.

3. Préparation des essais.

Ces tests se sont déroulés en 3 phases :

- Une première phase de reconnaissance, au mois de mai 2010, pour localiser un panel de dégradations représentatif du catalogue fourni par le STAC, aussi bien sur chaussées souples que sur chaussées humides. Au final, 38 dégradations ont été retenues avec un levé GPS pour chacune d'entre elles ;
- La deuxième phase s'est déroulée le 22 juin 2010, jour des essais. Cette phase de préparation consistait à repérer les dégradations précédemment cataloguées par des marquages au sol ;
- La dernière phase consistait en la numérisation des dégradations par la tête *INO*, par des passages de jour mais aussi de nuit. Ainsi, chaque dégradation a été capturée au moins deux fois.

Sur chaussées souples, on dénombre ainsi 16 dégradations représentant chaque famille listée dans le catalogue des dégradations du STAC.

Dégradations	Degré de gravité	Observations
Flache		Fissure de retrait
Flache	E	H= 2,5 cm
Flache	L	
Marche	L	
Fissure de fatigue	L	
Fissure de fatigue	E	Végétation
Fissure de joint	M	Avec ramifications
Fissure de retrait	M	
Fissure de retrait	L	
Faïençages		De fatigue au début, de retrait ensuite
Faïençage de retrait	L	
Brûlure	L	
Brûlure	E	Départ massif de granulats
Brûlure	E	Départ massif de granulats
Désenrobage	L	Déchaussement de granulats
Gomme		

Ces essais ont été complétés par des tests sur le réseau routier Rouennais, afin de connaître les performances du capteur sur les dégradations manquantes répertoriées dans le catalogue du STAC. Ces tests complémentaires nous permettent d'avoir un aperçu des réponses du capteur *INO LCMS* sur d'autres dégradations. Il faut toutefois noter que les différences de revêtements font que les signatures des dégradations peuvent être différentes sur pistes aéronautiques.

Les dégradations suivantes ont été testées sur les routes rouennaises :

- Famille des déformations : bourrelet ;
- Famille des fissures : fissure parabolique ;
- Famille des arrachements : pelade et nid de poule ;
- Autres : poinçonnement, ressuage, réparation dégradée.

Les dégradations non testées sont donc :

- Famille des déformations : ornière, déformation en W ;
- Autres : contamination, enrobé poreux, remontée d'eau et de fines.

Cependant, les contaminations ont été testées sur chaussées rigides, et nous avons testé la réponse du capteur *INO LCMS* à la présence d'eau sur la chaussée.

Sur chaussées rigides, 22 dégradations ont pu être testées par le *VIRESTIM* sur la base 105 :

Dégradations	Degré de gravité	Observations
Fissure	E	Départ de matériaux
Fissure	L à E	1 seul départ de cailloux (fracture à venir)
Fissure	E	Départ de matériaux
Fissure en coin	L	Fracture ?
Cassure d'angle	E	
Fracture	E	Départ de matériaux
Fracture	L	
Marche	L	Défaut de joint
Marche	M	Différence = 15 mm
Marche	L	Hauteur 5 mm
Épaufrure	E	Départ de matériaux
Épaufrure	L	Défaut de joint
Épaufrure	E	Départ de matériaux
Épaufrure	E	Départ de matériaux
Épaufrure	E	Départ de matériaux ou Écaillage < 1 m ²
Épaufrure	L	Défaut de joint E Faïençage léger
Épaufrure	E	Départ de matériaux
Défaut de joint	E	Végétation
épaufrure	E	Départ de matériaux
Faïençage	M	Écaillage < 1 m ²
Faïençage	L	
Faïençage	M	Écaillage < 1 m ²

Les dégradations n'ayant pas pu être relevées sont :

- Famille des dégradations de structure : pompage ;
- Autres : dépôt de gomme, réparation dégradée.

De plus, une dégradation de pompage a été simulée en disposant de l'eau au niveau du joint d'une dalle. Même si ce n'est pas une vraie dégradation, elle en possède l'aspect, et sera donc utilisée pour l'estimation des performances du capteur *INO LCMS*.

4. Déroulement des essais.

Les essais ont pu se dérouler le 22 juin 2010, grâce à une météo clémente et un accès libre à la piste après 17h. La numérisation des pistes s'est faite en deux temps, de jour comme de nuit :

- dans un premier temps, la piste et les taxiways ont été parcourus selon un circuit prédéfini, permettant de numériser une majorité des dégradations listées ;
- dans un second temps, le *VIRESTIM* a numérisé les dégradations restantes.



Tracé du circuit suivi par le Virestim.

La vitesse du véhicule *VIRESTIM* lors de l'acquisition des dégradations retenues était de l'ordre de 9 km/h, ce qui correspond à une résolution longitudinale de 1,7 millimètres. Cette vitesse s'est imposée du fait de l'impossibilité de rouler à la vitesse de 5km/h (un profil tous les millimètres) sans créer d'à-coups et de vibrations dans le véhicule.

Pour faciliter le passage du *VIRESTIM* et le repérage des dégradations lors du traitement des données, les dégradations ont été repérées par un plot pour délimiter un circuit à suivre, ainsi qu'un double marquage au sol : une marque avant la dégradation, du type *D#* pour marquer le commencement, et une marque du type *F#* pour en marquer la fin.

IV. Résultats des tests INO LCMS.

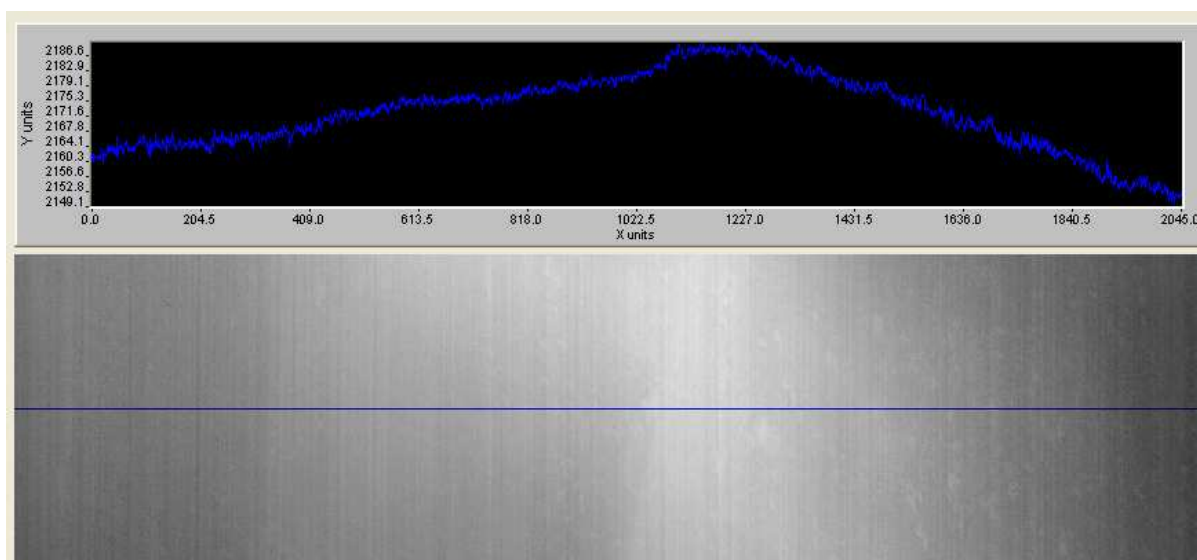
Les résultats obtenus avec le capteur INO LCMS sont présentés ci-dessous. Il faut bien noter que dans tout le rapport, la qualité des images est dégradée par rapport aux images originales.

1. Résultats sur section souple.

a) Famille des déformations.

Dans cette famille, les flaches, les marches et les bourrelets ont été testés.

Flaches : Les flaches se repèrent facilement par le bossage présent sur le profil transversal et la zone blanche qu'elles laissent sur la carte d'altitude. On peut ensuite mesurer sa profondeur en utilisant le profil transversal affiché au dessus de la carte d'altitude.



Flache visible sur le profil transversal.

Marches : Elles apparaissent fortement en créant une cassure sur les profils transversaux, et une ligne blanche sur la carte d'altitude. On peut mesurer la hauteur de marche par le profil transversal.

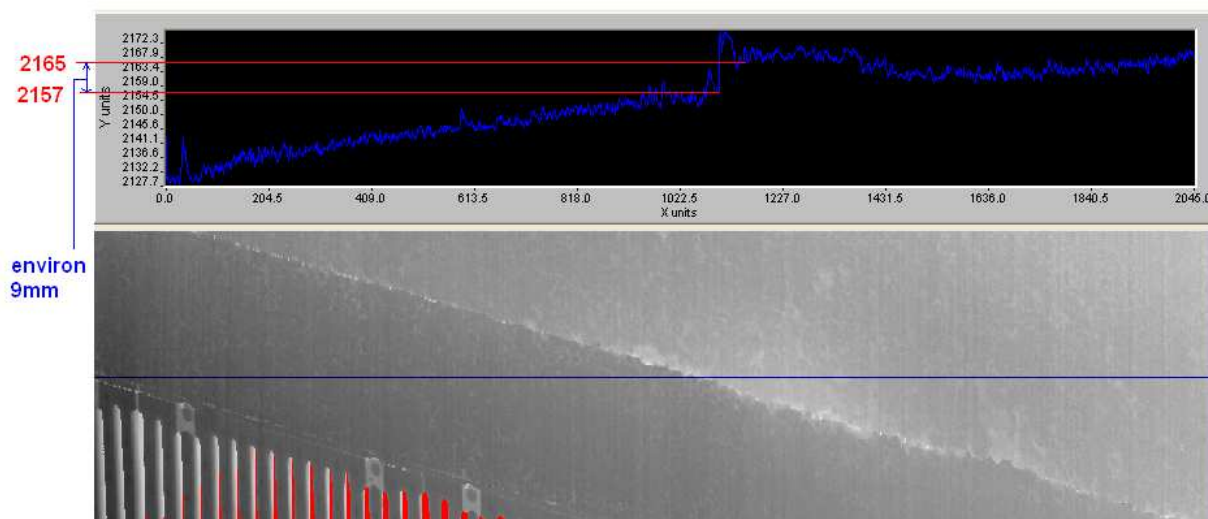
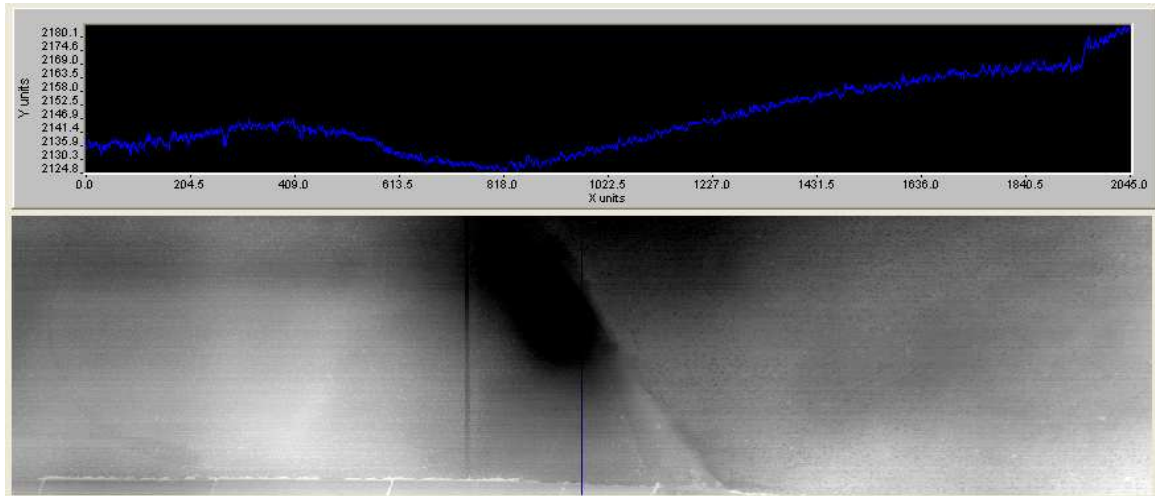


Illustration d'une marche : le profil vertical permet de la repérer et de classer le niveau de gravité (marche légère, 9 mm)

Bourrelets : Les bourrelets sont un peu plus difficiles à repérer à cause de la palette de couleur de la visionneuse : ils se repèrent par des tâches noires sur la carte d'altitude.



La tâche noire représente un bourrelet. Il est aussi visible sur le profil.

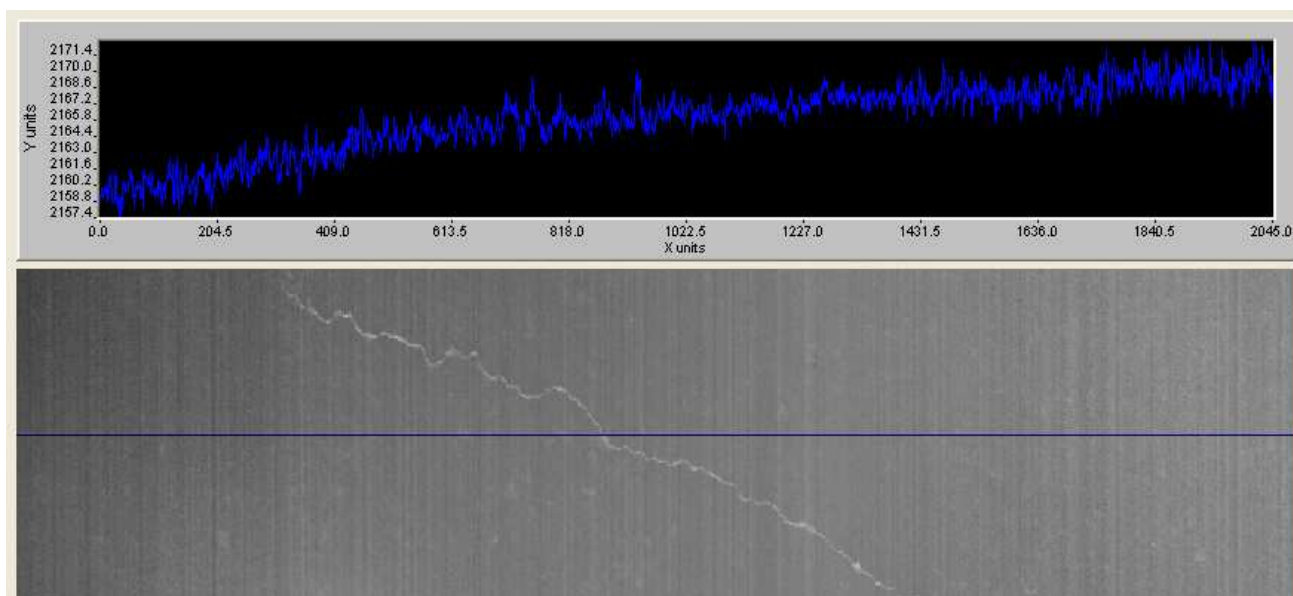
Ornières et déformations en W : En ce qui concerne les ornières et les déformations en W, même si aucun test n'a été effectué, du fait de la similarité de ces dégradations avec la flache, on peut penser qu'elles seront facilement repérables et qualifiables.

b) Famille des fissures.

Fissures : Il est difficile de repérer ces dégradations lorsqu'elles sont de niveau léger : l'imagerie de la chaussée n'est pas assez précise pour repérer efficacement une fissure ou un faïençage (lorsque leur ouverture est proche de la précision de 1mm du capteur), et la carte d'altitude ne les montre pas si elles ne sont pas assez profondes. On note par contre que les fissures de retrait se repèrent plus facilement que celles de fatigue.

On note aussi une difficulté supplémentaire sur les couches de roulement striées, car l'échelle d'altitude de la visionneuse se base sur ces stries, ce qui ne fait pas ressortir les différences de hauteur dues aux fissures.

Enfin, la visionneuse 3D peut aussi s'avérer très efficace pour aider à la caractérisation de la dégradation.

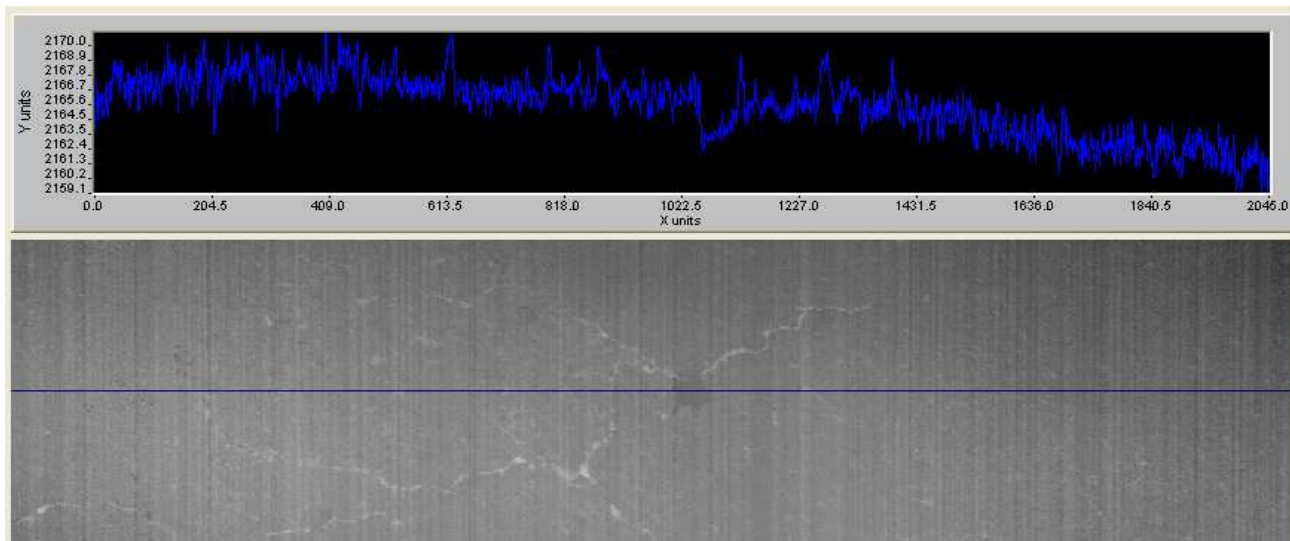


Une fissure de retrait légère : ici, la carte d'altitude permet le repérage.

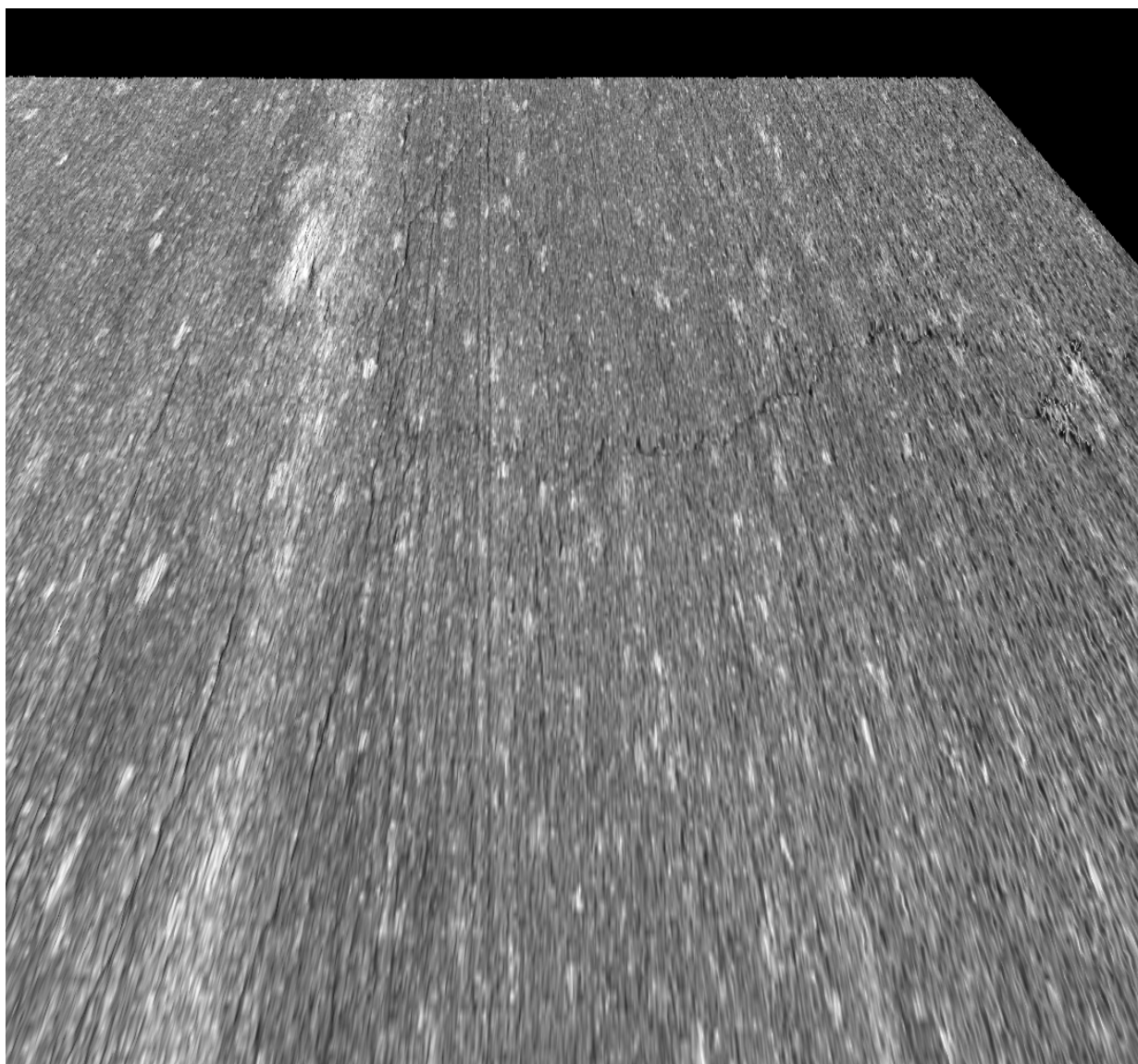


Fissure moyenne sur marquage au sol.

Faïençages : Les faïençages posent les mêmes problèmes que les fissures dans le cas d'un niveau de gravité léger. Là encore, la vue fusionnée 2D/3D peut permettre leur caractérisation.



Un faïençage léger en carte d'altitude : on distingue les fissures formant l'écaïlle.

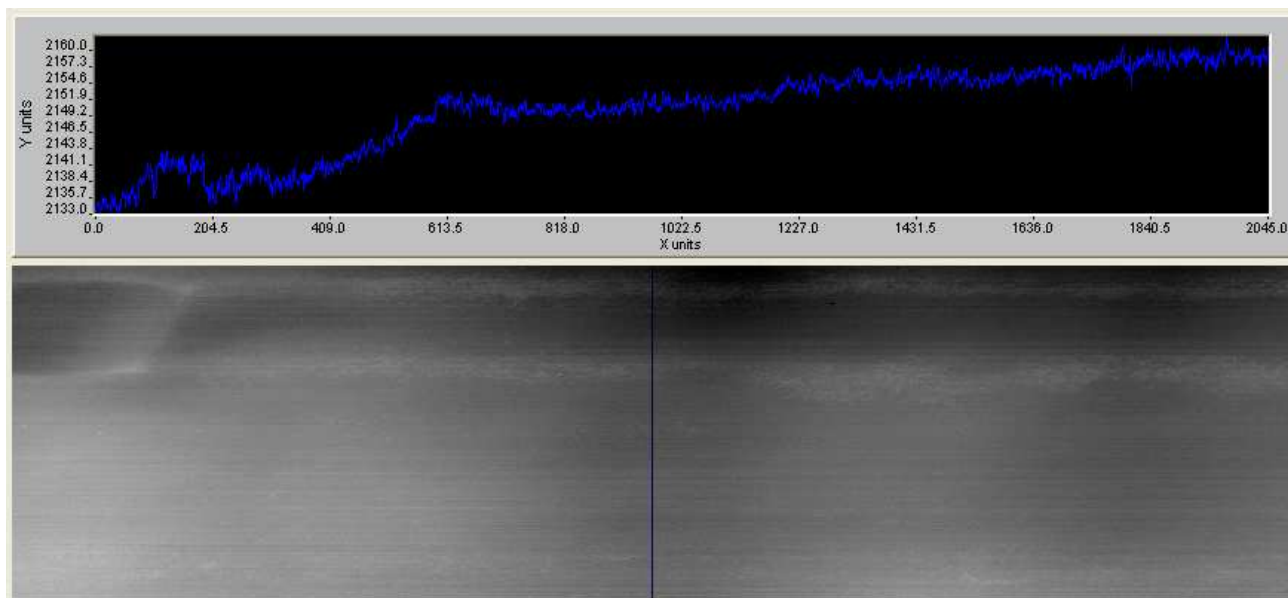


Un autre faïençage léger en vue fusion 2D/3D.

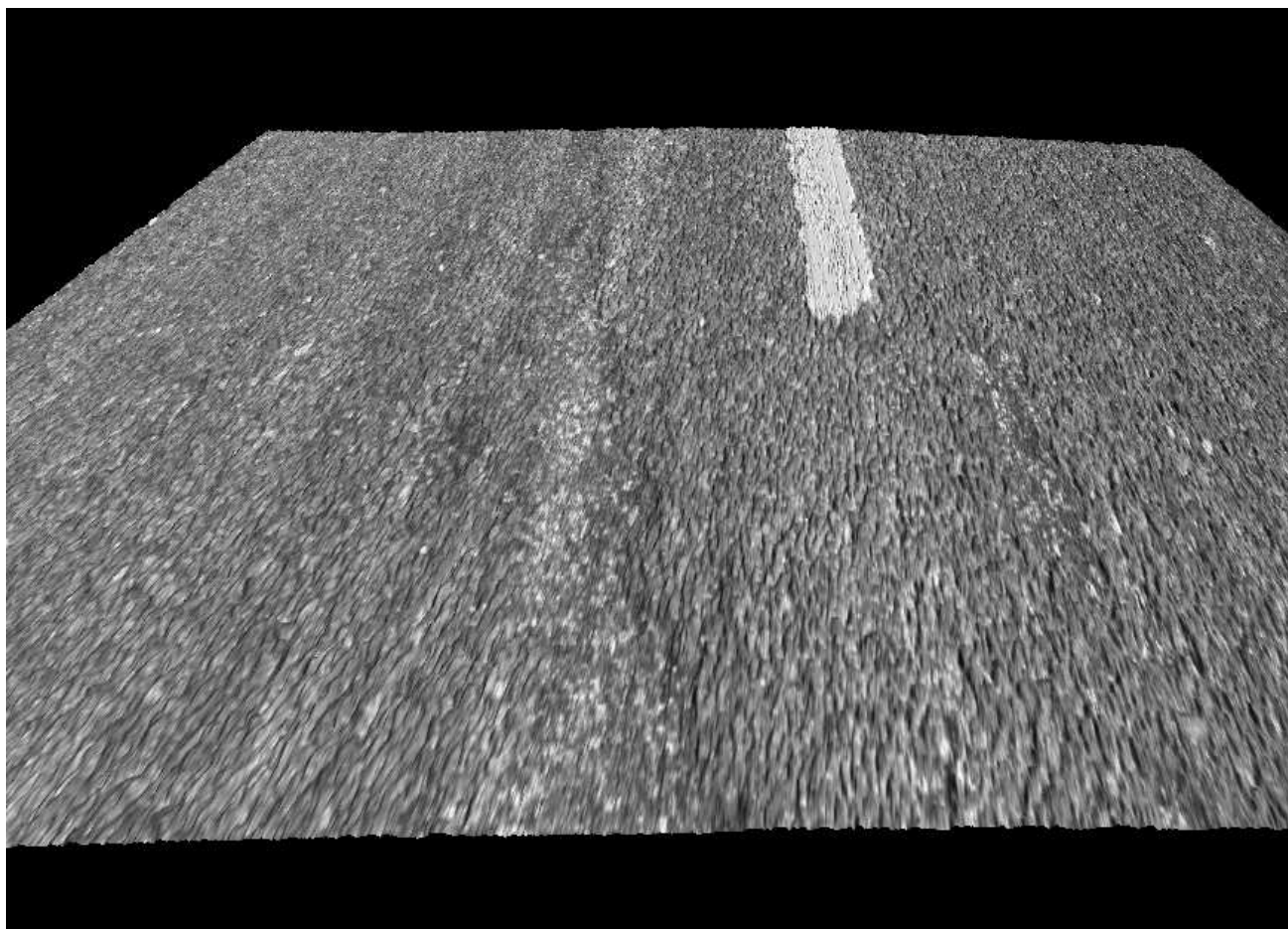
c) Famille des arrachements.

La famille des arrachements est assez facilement repérable.

Désenrobages : ils se repèrent grâce à la carte d'altitude. Ils se présentent sous la forme de traces grises. La vue fusionnée peut montrer le départ de matériaux.

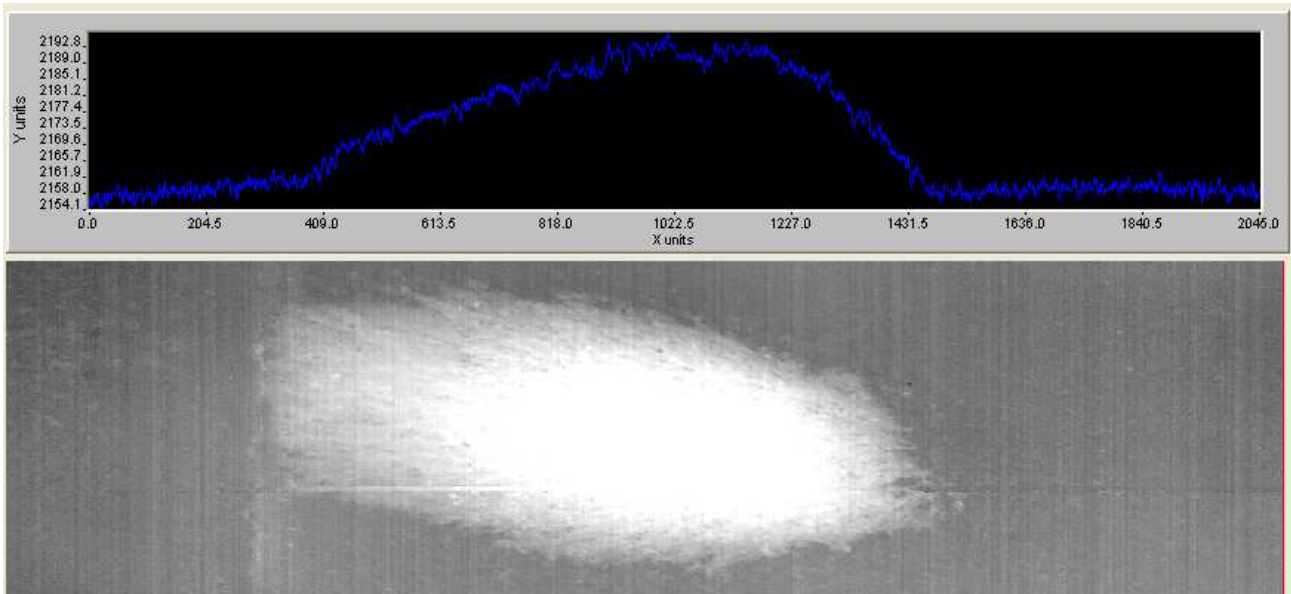


Un désenrobage repérable par les lignes grises.



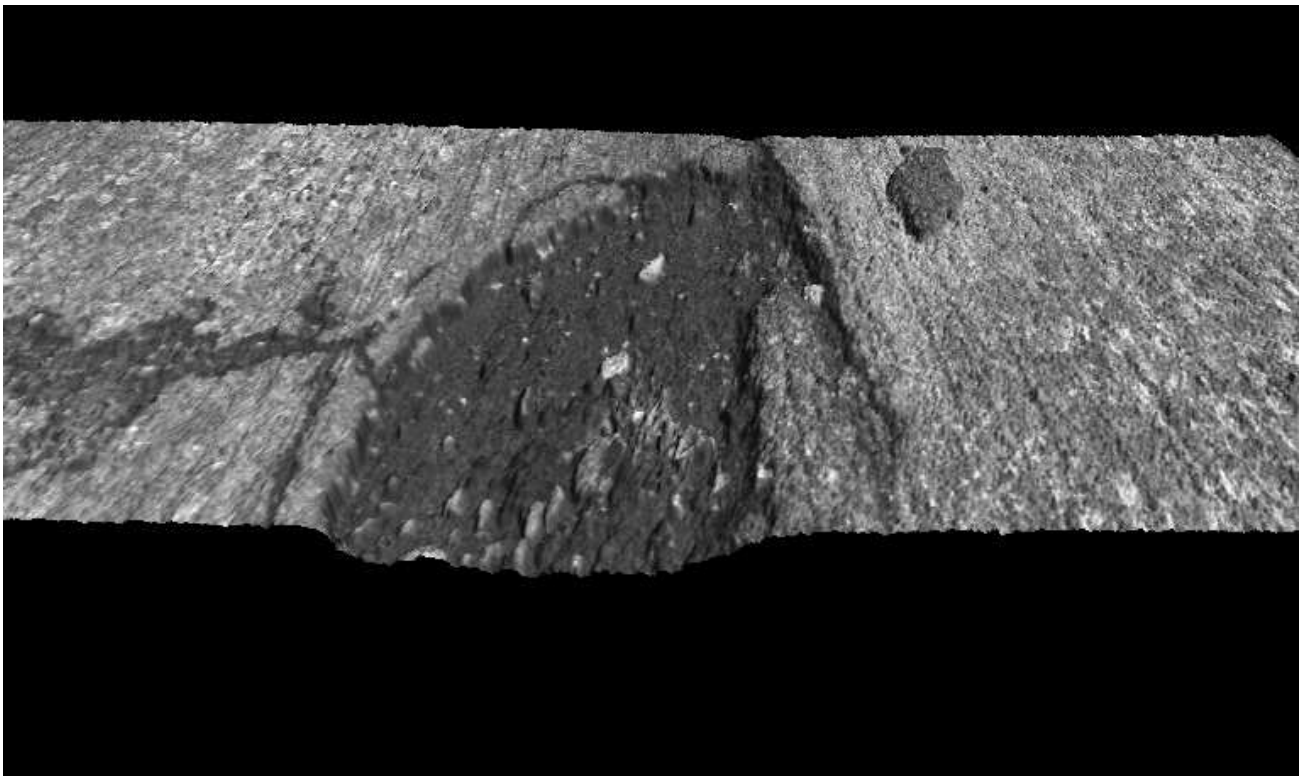
On aperçoit le désenrobage et le départ de matériaux en vue fusionnée.

Brûlures : Les brûlures se repèrent facilement grâce à la carte d'altitude. L'imagerie permet de distinguer sa couleur caractéristique.



Une brûlure élevée.

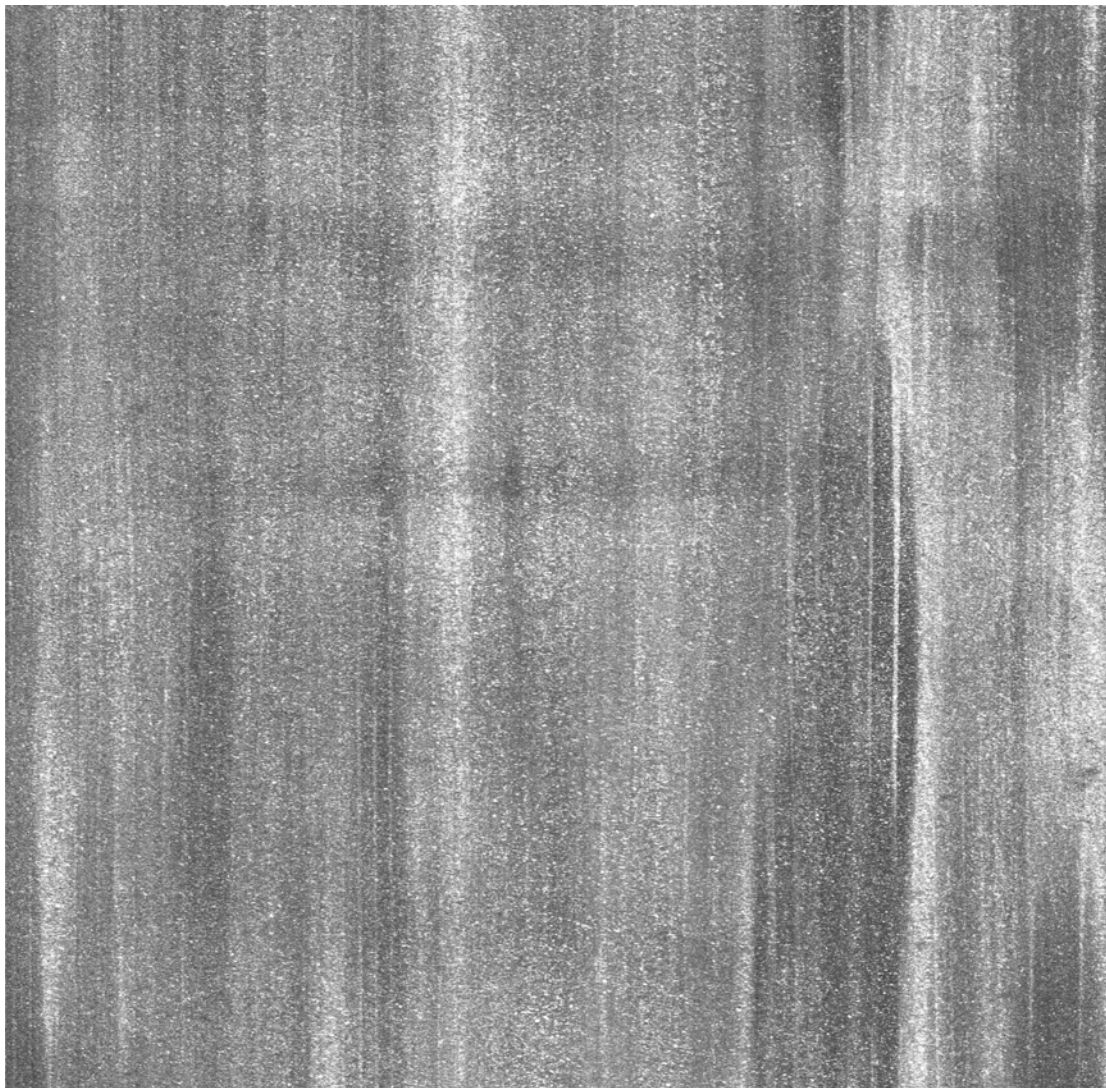
Pelades, nids de poules : Ces dégradations (testées sur les routes rouennaises) sont facilement repérables grâce à la carte d'altitude. La vue fusionnée peut aider à la caractérisation.



Nid de poule en vue fusionnée.

d) Autres.

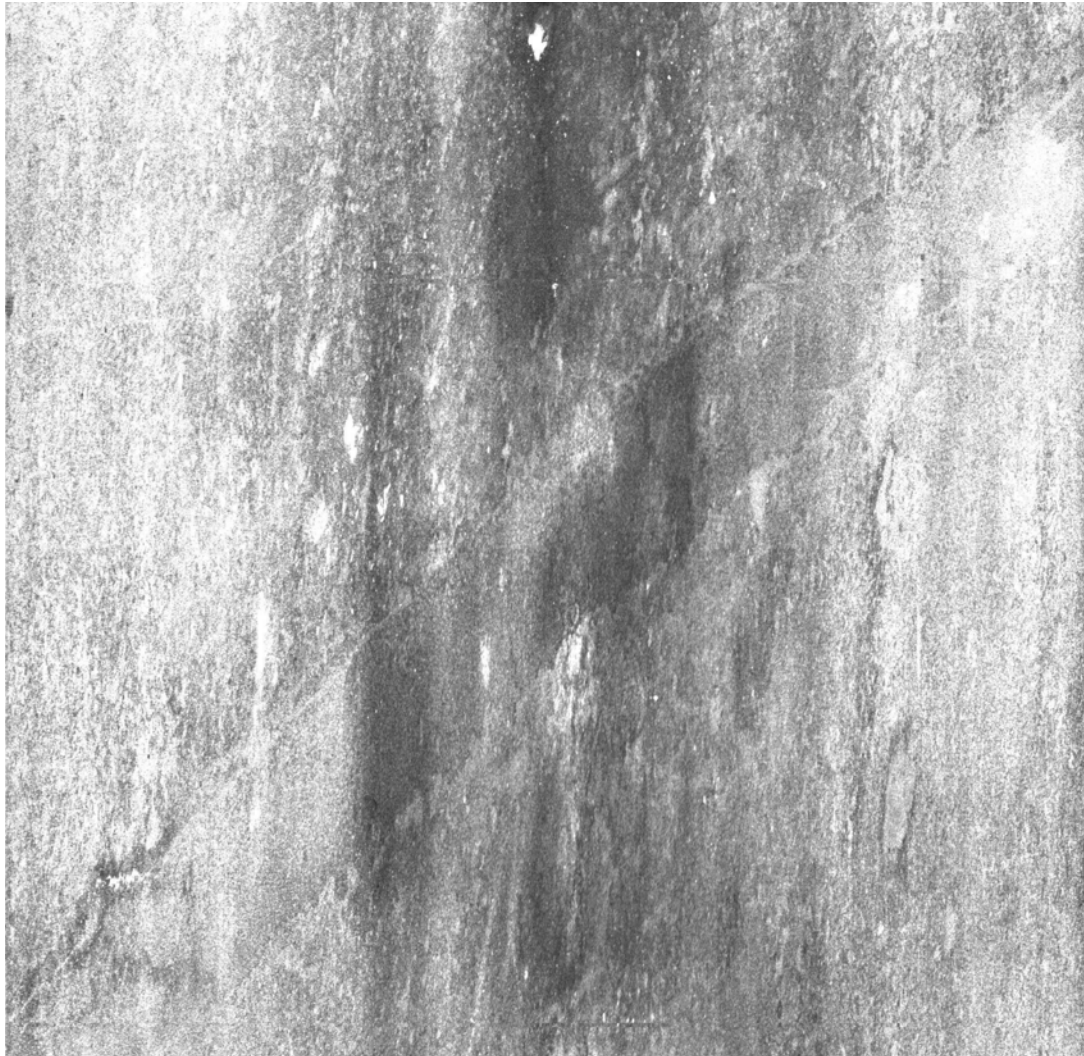
- Les poinçonnements se repèrent et se caractérisent grâce à la carte d'altitude. Tout comme pour les flaches ou les marches, l'information de hauteur se révèle très utile lorsque les dégradations forment des déformations de la chaussée.
- Les dépôts de gomme sont visibles sur l'imagerie. Ils laissent en plus des marques caractéristiques correspondant aux dessins des pneus, qui permettent de caractériser la dégradation. Il serait intéressant d'avoir une vue d'ensemble de la piste pour bien apercevoir la surface infectée par la gomme.



Un dépôt de gomme sur la piste.

- Le ressuage a été testé sur les routes de Rouen. Il est assez difficile à caractériser, mais on distingue facilement une anomalie sur la chaussée.
- Les remontées d'eau n'ont pas été testées directement, mais les tests effectués sur routes humides permettent d'affirmer qu'une trace d'eau sur la chaussée est facilement repérable. Il semble donc facile de caractériser une flaque d'eau sur la chaussée, mais il est peut être plus difficile de caractériser une petite zone humide.

- Les contaminations n'ont pas été testées sur chaussées souples, mais elles ont été numérisées sur chaussées rigides. Il pourra être difficile de différencier les dégradations qui apparaissent sous la forme de tâches sur le revêtement, en particulier les contaminations, les tâches d'eau (remontées d'eau) et le ressuage.



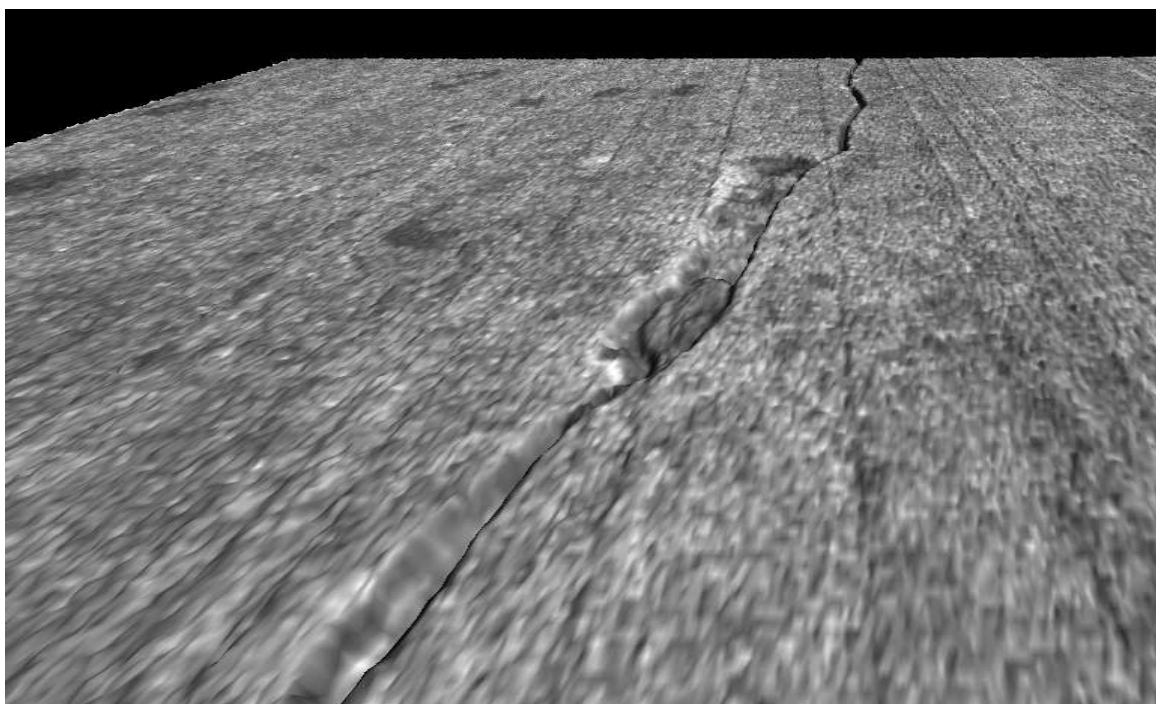
Une contamination. La trace laissée sur le sol peut être difficile à définir.

- Les enrobés poreux n'ont pas été testés. Cependant, il semble possible de les repérer. Il pourra être ensuite difficile de les différencier des désenrobages, car ils devraient présenter la même signature que ces derniers (tâches claires sur la carte d'altitude).
- Les remontées de fines semblent elles aussi repérables par l'imagerie. Par contre, elles constituent des tâches qu'il pourra être difficile de différencier des autres tâches.
- Enfin, les réparations dégradées seront probablement vues par l'image 2D et la carte d'altitude. La caractérisation ne devrait pas poser de problèmes particuliers.

2. Résultats sur section rigide.

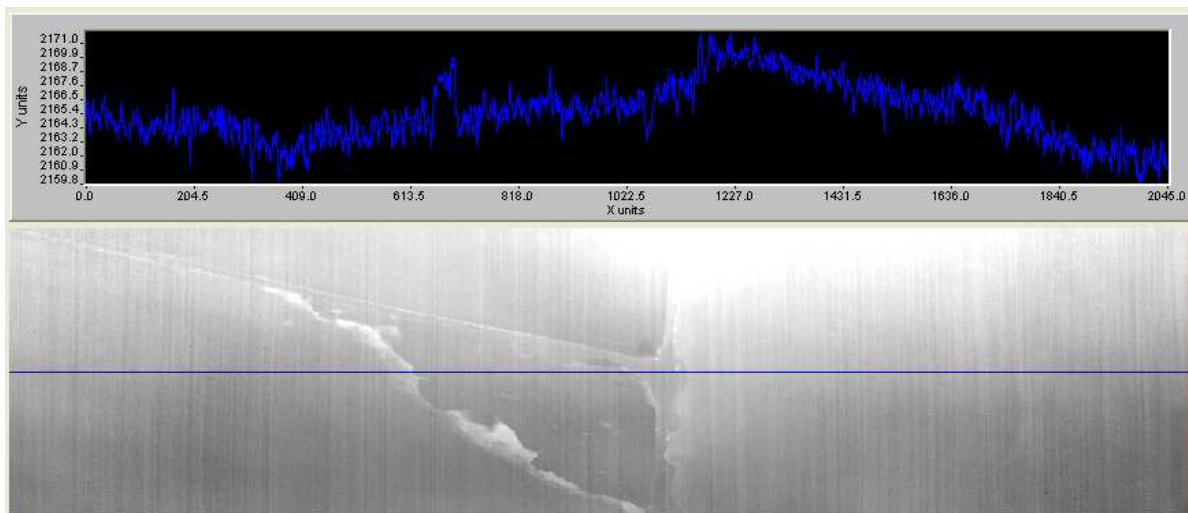
a) Dégradations de structure.

Fissures et fractures: Les fissures sont plus facilement repérables sur chaussée rigides que sur chaussées souples. Elles ressortent mieux sur l'imagerie 2D, du fait du contraste plus marqué par rapport au bitume. Néanmoins, certaines fissures très légères peuvent rester invisibles, et en particulier lorsqu'elles ne sont pas creusées. Là encore, la vision 3D peut donner un meilleur aperçu. Pour les fractures, il est nécessaire de pouvoir visionner une dalle complète pour juger de la nature de la dégradation.



Fissure avec départ de matériaux.

Cassures d'angle : Les cassures d'angles se distinguent relativement bien. Cependant, tous comme les fissures, elle peuvent poser problèmes si elles sont très légères.



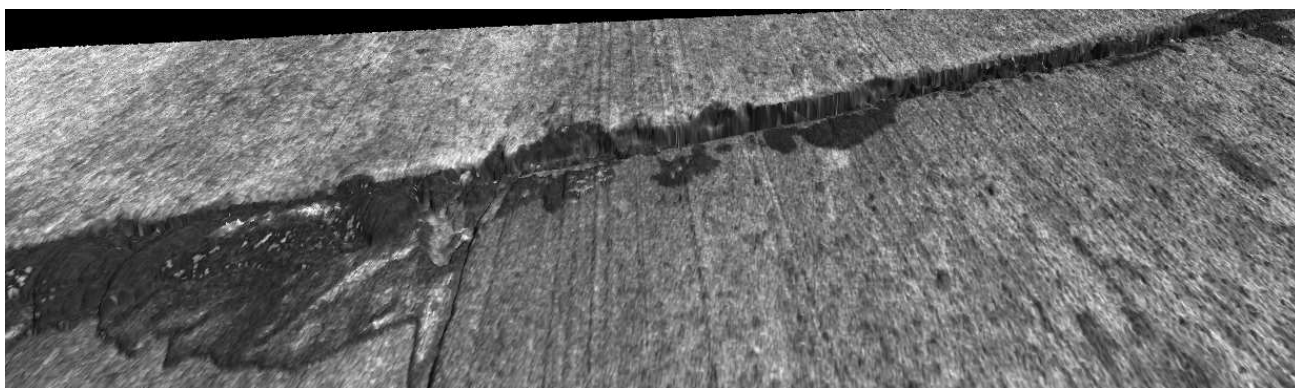
Cassure d'angle avec départ de matériaux.

Pompages : Le pompage a été simulé dans le CETE Normandie Centre en créant une flaque d'eau sur un joint de dalles. On remarque une tâche caractéristique de l'eau (brillance du revêtement sur la zone humide et aspect plus mate pour les flaques).



Une dégradation de pompage sur un joint de dalles.

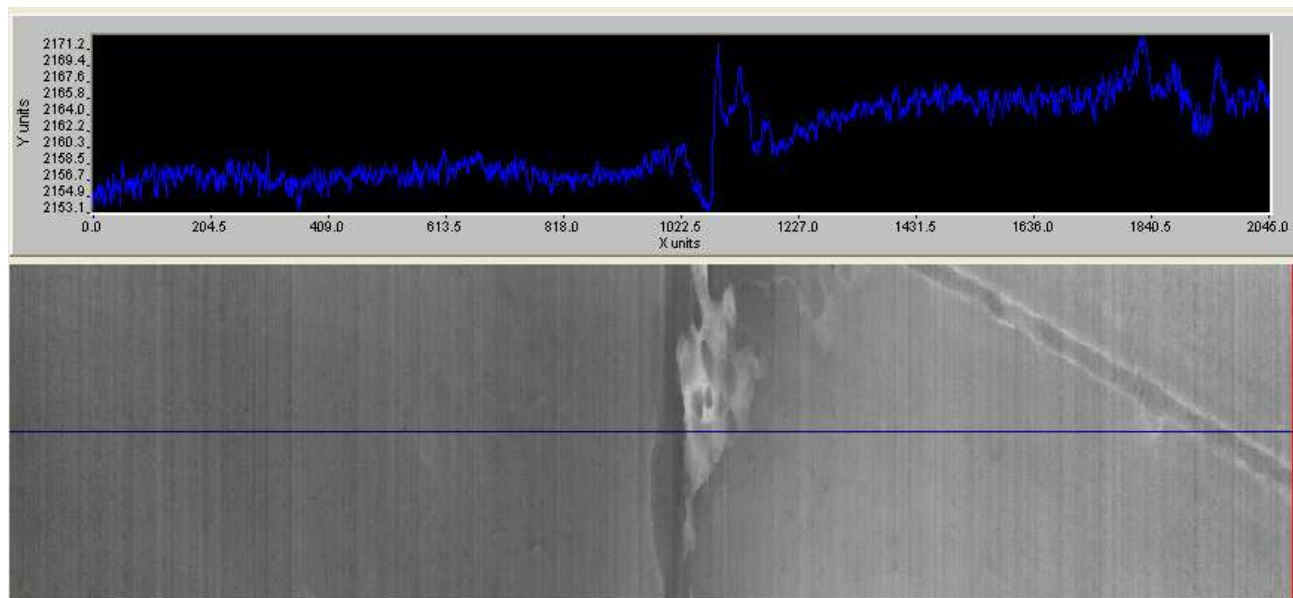
Marches : Tout comme sur les chaussées souples, les marches sont facilement repérables.



Une marche entre 2 dalles. Il y a aussi un défaut de joint.

b) Dégradations de surface.

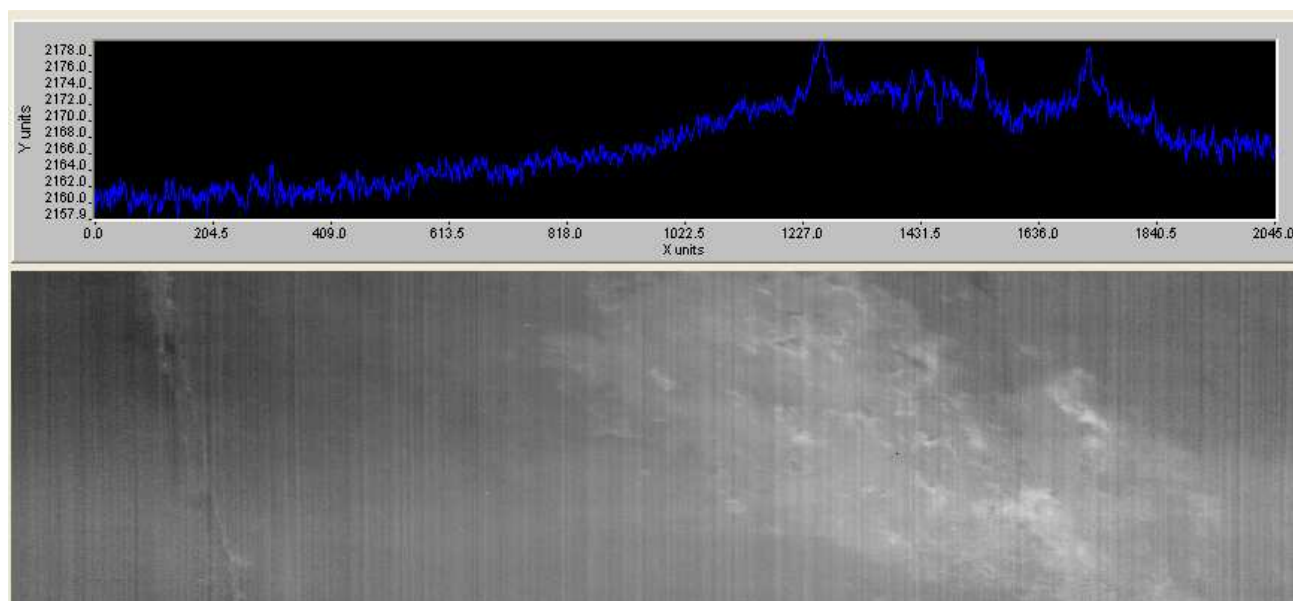
Épaufrures : Les épaufrures sont facilement décelables, grâce aux différences de hauteur dues aux départs de matériaux. Les trois vues permettent de les repérer et de les identifier. Cependant, les épaufrures légères sans départ de matériaux sont plus difficiles à déceler.



Epaufrure avec départ de matériaux.

Faïençages, écaillages : Les faïençages sont difficilement décelables. Souvent, les fissures sont trop étroites et trop peu profondes pour les distinguer avec la carte d'altitude, et ne ressortent pas assez sur l'imagerie 2D.

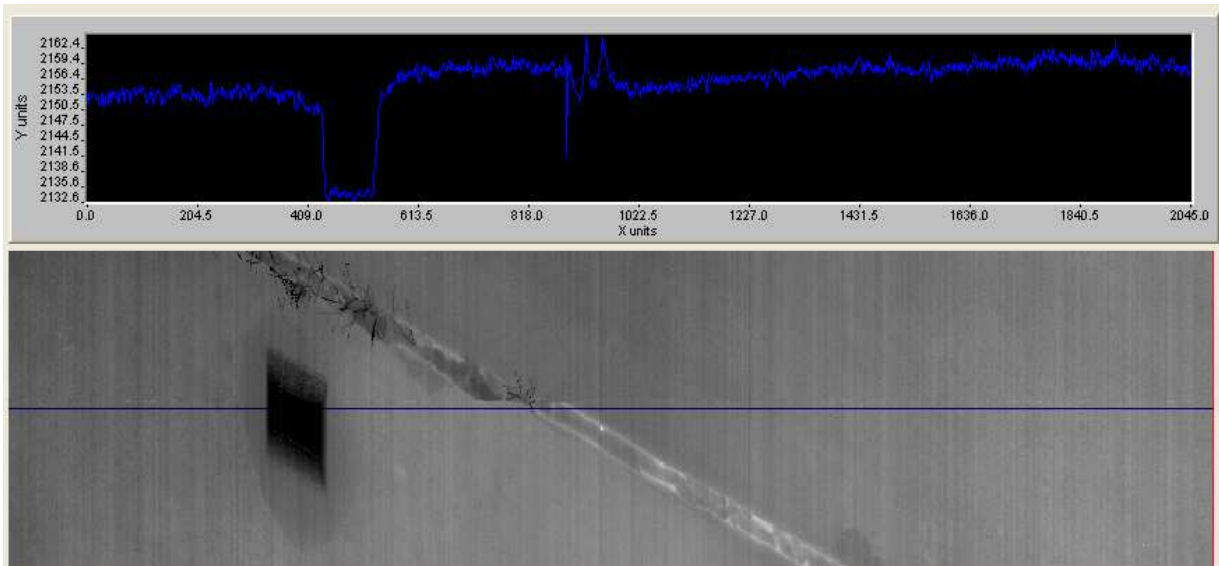
Les écaillages sont par contre facilement visibles, car ils laissent des tâches grises sur la carte d'altitude et ont un aspect particulier à l'image.



Ecaillage moyen vu en carte d'altitude.

c) Dégradations de joints.

Les défauts de joint sont assez facilement décelables et identifiables. La végétation ressort aussi fortement sur les trois vues disponibles.

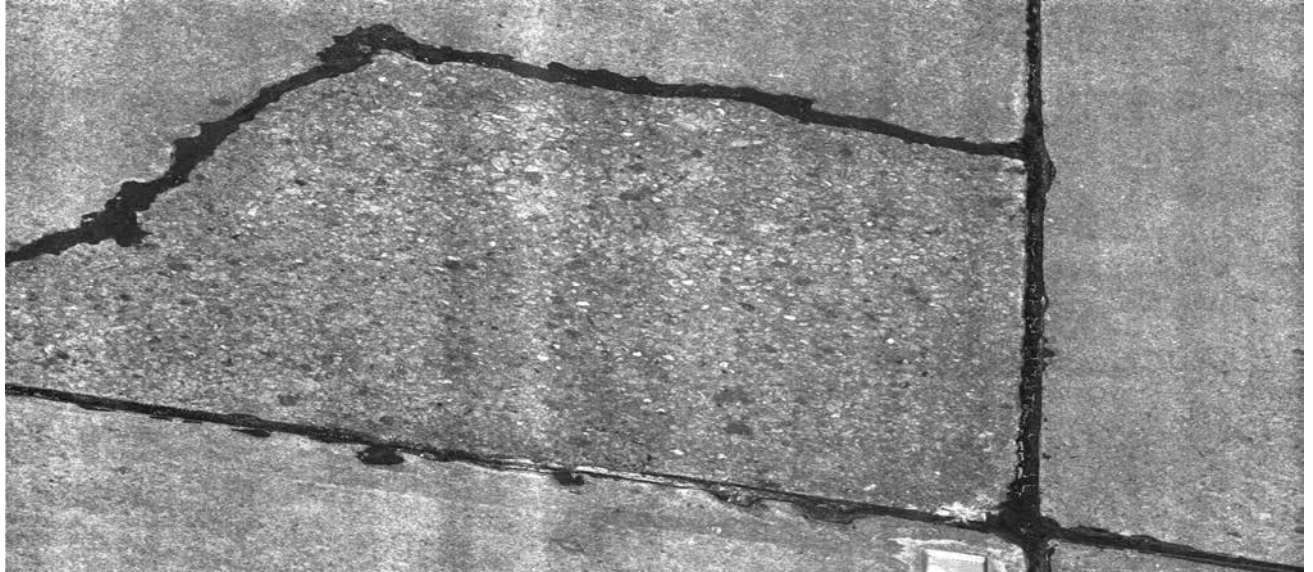


Un défaut de joint, que la présence de végétation rend élevé.

d) Autres.

Dépôt de gomme : il n'a pas été trouvé sur chaussées rigides. Cependant, il est visible sur chaussées souples. On peut alors estimer qu'il l'est aussi sur chaussées rigides, car les contrastes de couleur entre la gomme et le revêtement sont plus marqués.

Réparation dégradée : On distingue assez facilement les réparations, notamment celles concernant les fissures, par la présence de mastic sur les dalles. Les réparations dégradées semblent être repérables et qualifiables.



Une réparation en coin de dalle.

3. Conclusion.

Résultats convaincants :

- **bonne visibilité des déformations** : La carte d'altitude disponible avec le capteur *INO LCMS* permet de repérer les déformations qui n'étaient pas visibles avec l'imagerie seule. On peut ensuite calculer la différence de hauteur pour caractériser plus finement la dégradation.
- **Repérage des départs de matériaux** : les départs de matériaux créent une différence de hauteur facilement repérable par la carte d'altitude. Cela s'avère utile pour faire ressortir, les épaufrures, les désenrobages, et les fissures lorsqu'elles sont creusées et propres.

Des problèmes persistent :

- **problème des fissures et faïençages légers** : Le capteur *INO LCMS* a montré des résultats encourageants sur les dégradations de la base 105. Ce capteur montre des avantages certains, notamment en ce qui concerne le repérage des déformations de la chaussée, et de toutes dégradations ayant un relief, grâce à la mesure de l'altitude. Par contre, certaines dégradations, comme les dégradations de surface de niveau léger, sont difficilement décelables, mais sont parfois qualifiables en utilisant les zooms et autres options offertes par les visionneuses *INO*.
- **problème des tâches** : il est aussi difficile de différencier les différentes dégradations se présentant sous forme de tâches, comme les remontées d'eau, de fines, les contaminations, le ressuage et dans une moindre mesure, les dépôts de gomme.
- **les performances du capteur dépendent de la nature et de la couleur du revêtement** : le capteur est sensible au bruit provoqué par la texture du revêtement. Si la texture présente beaucoup de discontinuités, il sera plus difficile de repérer les fissures fines. De même, la couleur du revêtement peut jouer un rôle. Les fissures peuvent mieux ressortir sur des revêtements clairs, car le contraste sera alors plus élevé.
- **effet de peignage de l'image.**

Pas de différence de jour / nuit : ce capteur permet des mesures de nuit sans perte d'informations. Les images obtenues de jour et de nuit sont identiques, ce qui permettrait de faire les mesures d'IS pendant les périodes de non-activité des pistes.

Utilisation possible sur chaussées rigides : la technologie laser, qui permet de se passer de spots d'éclairage, donne une image de bonne qualité sur chaussées rigides. Il n'y a pas, avec ce système, de perte d'informations sur ces surfaces, due à un éblouissement, comme nous avons pu le voir avec l'*AIGLE RN*. Au final, on dispose de la même qualité d'image pour les chaussées souples et les chaussées rigides.

Visibilité de la végétation : la végétation possède une signature particulière, et est facilement repérable, aussi bien par l'imagerie 2D, la carte d'altitude ou la vision 3D. Cependant, la présence de mousse n'est pas décelable.

Nécessité de prendre en compte les mouvements de caisse : les mouvements du véhicule se retrouvent sur les profils transversaux acquis par le capteur. Cela se répercute à l'écran par une inclinaison des profils, qui peut prêter à confusion. Cela pourrait être corrigé par la prise en compte de ces mouvements à l'aide d'une centrale inertielle.

V. Tests de la caméra couleur de l'IRCAN.

1. Objectif.

La caméra du véhicule *IRCAN* a été testée sur les pistes et taxiways de la base 105 durant le mois de septembre 2010. L'objectif de ces essais était de connaître les performances d'une caméra couleur sur les dégradations relevées précédemment lors des essais avec le capteur *LCMS* d'*INO*.

Ainsi, nous avons tenté de répondre aux mêmes questions :

- Peut-on déceler la présence d'une dégradation à partir des images collectées par la caméra couleur de l'*IRCAN* ?
- Le cas échéant, peut-on caractériser le type et le niveau de gravité de la dégradation ?

D'autres essais ont été effectués de nuit, avec l'éclairage des feux antibrouillard pour estimer les performances du matériel *IRCAN* de nuit.

2. Configuration du matériel.

La caméra couleur utilisée était dirigée vers la route, donnant une vision proche de celle du releveur lors d'un relevé d'IS. Deux angles d'inclinaison ont été testés (38° et 47°), correspondant à une longueur de prise de vue de 1,30 mètres et 1,80 mètres. Les données ont été visionnées grâce au logiciel d'exploitation de l'*IRCAN*, nommé *IREVE* (développé par le LRPC de Strasbourg et le CECP d'Angers), dont les paramètres sont optimisés pour la position normale de la caméra, c'est à dire sur le toit du véhicule. Les outils développés, comme la grille de calibration des mesures, ne sont donc pas utilisables avec ces données.



Véhicule *IRCAN* : la caméra est ici dirigée vers la chaussée.

3. Déroulement des essais.

Le véhicule *IRCAN* a numérisé la plupart des dégradations relevées par le capteur *INO*, et en particulier les fissures et faïençages. La chaussée était mouillée au départ des tests, et séchait au fur et à mesure. La luminosité était aussi mauvaise, le ciel étant couvert. Ainsi, les conditions météorologiques n'étaient pas optimales pour effectuer ces tests.

Le véhicule avançait à une vitesse proche de 15 km/h. Un réglage de l'obturateur de la caméra était appliqué à chaque changement de type de revêtement (passage d'une chaussée souple à une chaussée rigide) pour améliorer la qualité de l'image.

4. Résultats.

a) Chaussées souples.

- La caméra couleur de l'*IRCAN* ne permet pas de repérer les dégradations de la famille des déformations, car elle ne donne pas d'informations sur le relief de la piste.
- L'*IRCAN* permet de repérer efficacement les dégradations de la famille des fissures. Ces résultats sont à relativiser, du fait de la présence d'eau à l'intérieur des fissures qui les faisait ressortir à l'image le jour des essais. Néanmoins, les fissures et faïençages légers semblent repérables et qualifiables.



Faïençage de fatigue vu par l'*IRCAN*.

- Le désenrobage léger peut être difficile à repérer sur les images *IRCAN*. Les autres dégradations de la famille des arrachements ne posent pas de problèmes particuliers.
- La couleur apporte un plus sur les autres dégradations, en particulier pour les tâches qu'il devient alors possible d'identifier.

b) Chaussées rigides.

- Les dégradations de structure (fissures, fractures, cassures d'angle, pompages et marches) sont repérables à l'aide de la caméra couleur de l'*IRCAN*, exceptées les marches du fait du manque d'informations sur le relief.



Une fissure de retrait détecté par l'*IRCAN*.

- Les faïençages très légers sont très difficilement repérables.
- Les autres dégradations sont décelables.

5. Utilisation de nuit.

Les tests effectués montrent que l'éclairage du véhicule est, en l'état, insuffisant pour effectuer un relevé de nuit. Cependant, l'utilisation de nuit semble possible à condition de rajouter des projecteurs permettant de maîtriser l'éclairage. Une étude supplémentaire s'avère nécessaire pour juger de cette possibilité.



Une prise de vue de nuit avec l'IRCAN (chaussée éclairée par feux antibrouillard).

6. Conclusion.

Facilité à déceler les dégradations de surface : la caméra couleur permet de repérer les dégradations de surface ; en particulier sur chaussées souples, les fissures et faïençages légers qui étaient difficilement décelables avec le capteur *INO LCMS* sont visibles. Par contre, sur chaussées rigides, les faïençages très légers restent difficiles à repérer.

Différenciation des tâches : l'imagerie couleur permet de se rendre compte de la nature des tâches présentes sur la chaussée : eau, ressuage, remontée de fines, contamination...

Difficulté de repérer les déformations : la caméra ne permet pas de voir les flaches et ornières. Les marches et bourrelets peuvent être vus selon l'angle de prise de vue.

Problèmes d'ombres et d'illumination : Dans le domaine routier, des problèmes d'ombres portées sur la route, et d'illumination excessive lors du passage d'une zone d'ombre à une zone éclairée perturbent les relevés. Ces défauts sont minorés sur chaussées aéronautiques, pour lesquelles le seul risque d'ombre provient du véhicule lui-même.

Problèmes des conditions météorologiques : Les releveurs *IRCAN* précisent que les conditions météorologiques optimales pour réaliser leurs relevés sont celles obtenues par beau temps avec un soleil haut (cela permet de limiter l'ombre portée et de maximiser la luminosité). Il faudrait alors prévoir un système d'éclairage pour maîtriser la luminosité et pour pouvoir utiliser cette caméra de nuit.

VI. Estimation des performances métrologiques requises.

1. Performances requises pour l'imagerie.

Les tests du capteur *INO LCMS* montrent qu'il est possible de repérer et caractériser la plupart des dégradations. Cependant, certaines fissures légères et faïençages légers ne sont pas visibles. Nous sommes donc retournés sur la base 105 pour essayer d'expliquer pourquoi certaines fissures ne sont pas repérables. Il s'avère :

- **Sur chaussées souples** : les fissures et faïençages difficilement repérables sont peu ouverts (moins d'un millimètre et donc en deçà des performances de l'*INO LCMS*) et très peu profonds. La présence de mousse peut également gommer la différence de profondeur. De plus, sur les couches de roulement striées, les fissures de faible profondeur se confondent avec le bruit plus important du revêtement.
- **Sur chaussées rigides** : les fissures et faïençages qui ne sont pas repérables sont d'ouvertures quasi nulles, et sans profondeur. La dégradation est superficielle, et pas assez marquée pour apparaître en imagerie 2D.

Ainsi, la résolution nécessaire à la mesure d'IS à grand rendement, avec un capteur monochrome, est inférieure à celle du capteur *INO LCMS*, c'est à dire 1mm en longitudinal et transversal.

2. Performances requises pour le système de guidage.

D'après la méthode de guidage laser utilisée lors des essais de l'AIGLE RN en 2009, et la précision d'un pilotage de véhicule, la qualité de l'information GPS devra être de l'ordre de 10 centimètres pour permettre un recollement correct des images et limiter le chevauchement, et donc éviter de recenser deux fois la même dégradation.

VII. Solutions envisagées, contraintes d'utilisation.

1. Comparaison des capteurs proposés.

Les tests effectués en 2009 avec l'*AIGLE RN*, puis en 2010 avec l'*INO LCMS* puis avec la caméra couleur de l'*IRCAN* nous permettent de comparer les performances des capteurs.

Imagerie 2D : l'*IRCAN* donne les meilleurs résultats, en condition météorologique favorable, et permet notamment de visualiser les faïençages sur chaussées souples. Par contre, l'angle de prise de vue ne permet pas de recoller les photos pour disposer d'une reconstitution d'une piste entière.

L'*AIGLE RN* puis le capteur *INO LCMS* viennent ensuite. L'imagerie noir et blanc rend plus difficile la caractérisation des dégradations. Certains faïençages ne sont pas repérables.

Sur chaussées rigides, les faïençages très légers restent un problème pour tous les capteurs.

Déformations : seul le capteur *INO LCMS* permet de voir les déformations, avec des résultats très satisfaisants. L'*IRCAN* et l'*AIGLE RN* permettent de repérer les nids de poules et les pelades.

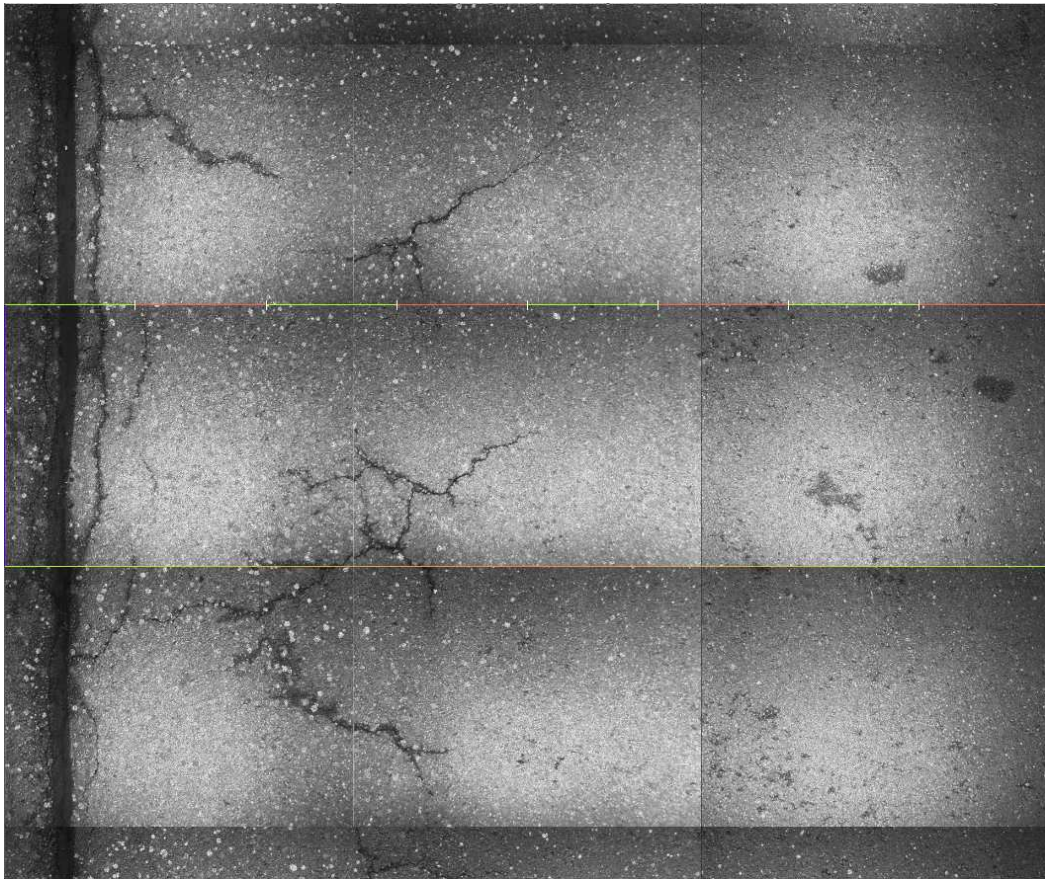
Nuit : Le capteur *INO LCMS* permet d'effectuer les acquisitions de nuit. L'*AIGLE RN* a démontré son inefficacité en l'état. Une étude supplémentaire s'avère nécessaire pour juger de l'aptitude de l'*IRCAN* avec un éclairage supplémentaire.

Le seul capteur non testé, l'*INO LRIS*, promet une meilleure résolution d'image que l'*INO LCMS* (résolution de 0,5 mm). Par contre, il ne permet pas de voir les déformations.

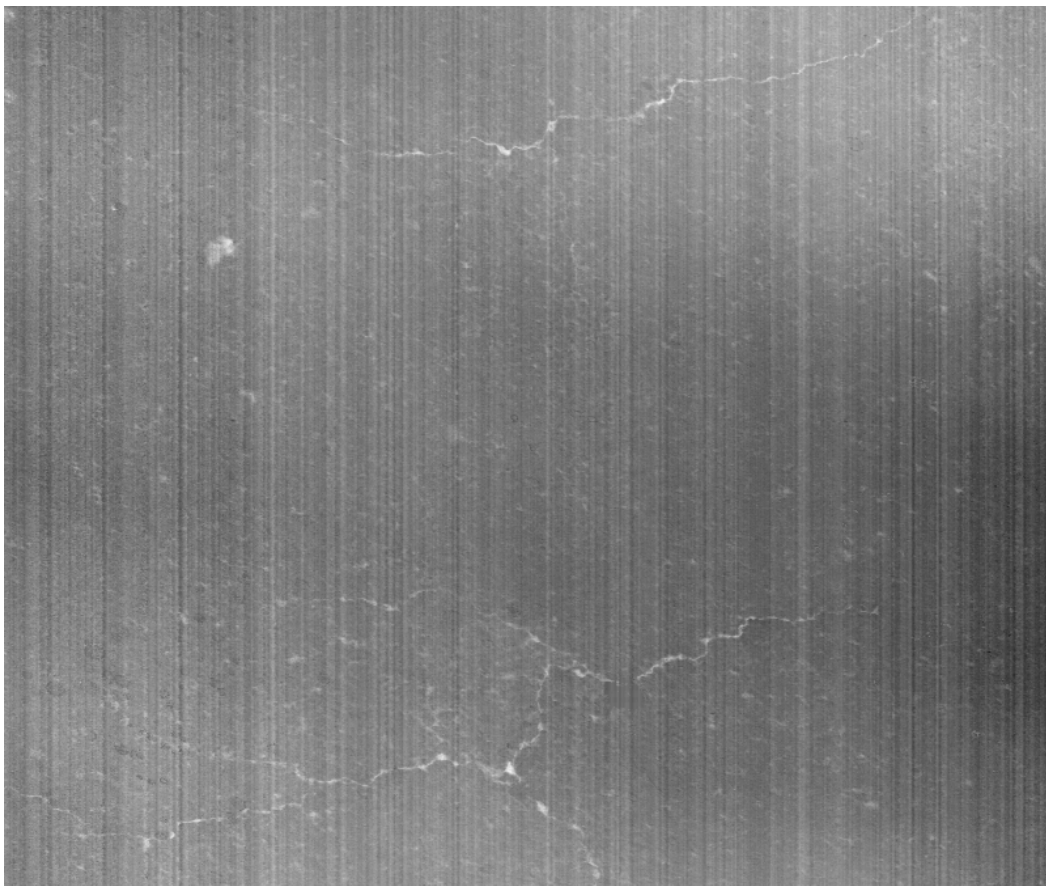
Il est à noter que la version 2010 du capteur *INO LCMS* devrait améliorer l'imagerie de ce capteur.



Un faïençage léger capturé avec l'*IRCAN*.



Le même faïençage capturé avec l'*AIGLE RN*.



La carte d'altitude *INO LCMS* du faïençage.

2. Solutions envisagées.

En plus de l'*AIGLE RN* qui servira de référence, nous retiendrons cinq solutions embarquant et couplant les divers capteurs présentés précédemment. Pour chacune de ces solutions, nous présentons les avantages et inconvénients, ainsi que les contraintes de fonctionnement. Il est ainsi tenu compte de :

- La possibilité d'un relevé de nuit ;
- Les conditions météorologiques et l'état de la piste ;
- La vitesse du véhicule en acquisition ;
- La durée de neutralisation de la piste. Pour cela, nous prendrons l'exemple de la piste de la base 105 (3 kilomètres de long pour 45 mètres de large). En se reportant à la méthode du STAC, on relèvera la piste sur ces deux tiers centraux, soit une largeur totale de 30 mètres. La durée de neutralisation de la piste est calculée de la manière suivante :

On note :

t : temps de neutralisation de la piste (min)

L : longueur de la piste (km)

l : largeur de la piste (m)

v : vitesse du véhicule en acquisition (km/h)

x : largeur de prise de vue (m)

p : temps nécessaire au repositionnement du véhicule (min, estimé à 5 min)

On a alors :

$N = \text{partie entière} \left(\frac{l}{x} \right) + 1$: le nombre de passages à effectuer,

Et :

$$t = \frac{N * L}{v} * 60 + (N - 1) * p$$

- Le gabarit du véhicule et la nécessité d'étudier un système démontable ou repliable ;
- D'autres contraintes liées à la nature des capteurs employés.

Solution 1 (solution de référence) : L'AIGLE RN.

L'AIGLE RN a montré des résultats satisfaisants pour les relevés sur chaussées souples, mais moins bons pour les chaussées rigides. En particulier, les problèmes suivants ont été décelés :

- Difficulté de différencier les fissures et le faïençage ;
- Difficulté à juger de l'état des joints ;
- Problème de caractérisation de la végétation ;
- Problème d'éblouissement sur dalles bétons ;
- Impossibilité de mesures de nuit ;
- Impossibilité de relevés verticaux.

Utilisation de nuit	Impossible en l'état
Contraintes météorologiques	Le relevé peut s'effectuer sur chaussées humides, mais il est préférable de le faire sur chaussées sèches car la présence d'eau assombrit la chaussée et diminue donc le contraste
Vitesse du véhicule en acquisition	90 km/h
Durée de neutralisation de la piste	Environ 50 minutes
Gabarit du véhicule	Véhicule déjà existant : Master Renault, structure pour capteurs repliable
Autres	Nécessiterait un système de guidage adapté aux pistes aéronautiques

Solution 2 : Utilisation de caméra(s) couleur(s) type IRCAN à l'avant du véhicule.

- Relevé incomplet (pas de déformations) ;
- Avantage de la couleur ;
- Impossibilité de relevés verticaux ;
- Problèmes liés à l'éclairage (surtout la nuit) ;
- Etude supplémentaire nécessaire (choix des caméras et objectifs, nombre, positionnement).

Utilisation de nuit	Une étude s'avère nécessaire pour déterminer si un éclairage supplémentaire peut permettre à des caméras couleurs type IRCAN d'être utilisées de nuit
Contraintes météorologiques	Le relevé peut s'effectuer sur routes humides

Vitesse du véhicule en acquisition	Une vitesse faible, autour de 20 km/h, semble nécessaire pour une bonne qualité d'image
Durée de neutralisation de la piste	On pourrait utiliser plusieurs caméras pour cette solution. La ou les caméras permettraient d'avoir une largeur de prise de vue d'environ 4 m, ce qui donnerait un temps de neutralisation de la piste de l'ordre de 107 minutes

Gabarit du véhicule	Ce type de caméras peut s'installer sur un véhicule de type Scénic. Les caméras couleurs type IRCAN devront également être démontables, vu leurs positions envisagées à l'avant du véhicule
----------------------------	---

Autres	Impossibilité de recoller les photos pour avoir une vue complète de la piste
	Mesures dimensionnelles par grille de mesure moins précises qu'une méthode par pixels

Solution 3 : Utilisation de capteurs INO LCMS.

- Relevé complet (mais les fissures et faïençages légers sont difficiles à repérer) ;
- Pas de différence jour / nuit ;
- Problème de la caractérisation des tâches.

Utilisation de nuit	Possible en l'état
Contraintes météorologiques	Le relevé peut s'effectuer sur chaussées humides, mais il est préférable de le faire sur chaussées sèches car la présence d'eau assombrit la chaussée et diminue donc le contraste
Vitesse du véhicule en acquisition	Pour acquérir un profil tous les millimètres, le véhicule doit rouler à 20 km/h.
Durée de neutralisation de la piste	107 minutes avec 2 capteurs (4 m de prise de vue), 51 minutes avec 4 capteurs (8 m de prise de vue)
Gabarit du véhicule	Les capteurs doivent être installés à 2,2 m. Dans le cas d'une acquisition à 4 capteurs, il faudra prévoir une structure démontable ou repliable
Autres	L'utilisation de lasers nécessitera la prise en compte de la norme adéquate

Solution 4 : Utilisation de capteurs INO LCMS et de caméra(s) couleur(s) type IRCAN à l'avant du véhicule.

- Relevé complet ;
- Avantage de la couleur ;
- Etude supplémentaire nécessaire (choix des caméras et objectifs, nombre, positionnement) ;
- Etude supplémentaire de l'éclairage nécessaire pour l'utilisation de caméras type IRCAN de nuit.

Utilisation de nuit	Possible pour les capteurs LCMS. Une étude supplémentaire est nécessaire pour la caméra couleur
Contraintes météorologiques	Le relevé peut s'effectuer sur chaussées humides, mais il est préférable de le faire sur chaussées sèches car la présence d'eau assombrit la chaussée et diminue donc le contraste
Vitesse du véhicule en acquisition	Pour acquérir un profil tous les millimètres et avoir une bonne qualité d'image couleur, le véhicule doit rouler à 20 km/h
Durée de neutralisation de la piste	107 minutes avec 2 capteurs (4 m de prise de vue), 51 minutes avec 4 capteurs (8 m de prise de vue). Il faudra prévoir un nombre de caméras couleurs en adéquation avec la largeur de prise de vue du système INO
Gabarit du véhicule	Les capteurs INO doivent être installés à 2,2 m. Dans le cas d'une acquisition à 4 capteurs, il faudra prévoir une structure démontable. La ou les caméras type IRCAN devront également être démontables, vu leurs positions envisagées à l'avant du véhicule
Autres	Caméra type IRCAN : impossibilité de recoller les photos pour avoir une vue complète de la piste. Ces caméras permettront de repérer les zones de faïençages légers ou les fissures légères pour aide au dépouillement sur les images INO
	L'utilisation de lasers nécessitera la prise en compte de la norme adéquate

Solution 5 : Utilisation de capteurs INO LRIS et INO LCMS.

- Relevé complet (mais les fissures et faïençages légers sont difficiles à repérer) ;
- Pas de différence jour / nuit ;
- Problème de la caractérisation des tâches ;
- Image de meilleure qualité qu'avec le INO LCMS seul (selon constructeur).

Utilisation de nuit	Possible en l'état
Contraintes météorologiques	Le relevé peut s'effectuer sur chaussées humides, mais il est préférable de le faire sur chaussées sèches car la présence d'eau assombrit la chaussée et diminue donc le contraste.

Vitesse du véhicule en acquisition	Pour acquérir un profil vertical tous les millimètres, le véhicule doit rouler à 20 km/h. Il est toutefois possible d'acquérir à 80 km/h sans pertes sur l'imagerie, mais les profils verticaux seront acquis tous les 4 mm
Durée de neutralisation de la piste	107 minutes avec 2 capteurs (4 m de prise de vue), 51 minutes avec 4 capteurs (8 m de prise de vue)

Gabarit du véhicule	Les capteurs INO doivent être installés à 2,2 m. Dans le cas d'une acquisition à 4 capteurs, il faudra prévoir une structure démontable ou repliable
----------------------------	--

Autres	Les capteurs LCMS et LRIS seront placés à l'arrière du véhicule. Il faut donc prévoir une structure solide pour accueillir ces capteurs
	L'utilisation de lasers nécessitera la prise en compte de la norme adéquate

Solution 6 : Utilisation de capteurs INO LRIS, INO LCMS, et de caméra(s) couleur(s) type IRCAN.

- Relevé complet ;
- Avantage de la couleur ;
- Etude supplémentaire nécessaire (choix des caméras et objectifs, nombre, positionnement) ;
- Etude supplémentaire de l'éclairage nécessaire pour l'utilisation de caméras type IRCAN de nuit.

Utilisation de nuit	Possible pour les capteurs INO. Une étude supplémentaire est nécessaire pour la caméra couleur
Contraintes météorologiques	Le relevé peut s'effectuer sur chaussées humides, mais il est préférable de le faire sur chaussées sèches car la présence d'eau assombrit la chaussée et diminue donc le contraste
Vitesse du véhicule en acquisition	Pour acquérir un profil vertical tous les millimètres, le véhicule doit rouler à 20 km/h.
Durée de neutralisation de la piste	107 minutes avec 2 capteurs (4 m de prise de vue), 51 minutes avec 4 capteurs (8 m de prise de vue). Il faudra prévoir un nombre de caméras couleurs en adéquation avec la largeur de prise de vue des systèmes INO.
Gabarit du véhicule	Les capteurs INO doivent être installés à 2,2 m. Dans le cas d'une acquisition à 4 capteurs, il faudra prévoir une structure démontable ou repliable. La ou les caméras type IRCAN devront également être démontables, vu leurs positions envisagées à l'avant du véhicule
Autres	Les capteurs LCMS et LRIS seront placés à l'arrière du véhicule. Il faut donc prévoir une structure solide pour accueillir ces capteurs, et l'utilisation de la norme adéquate pour des capteurs lasers. Caméra type IRCAN : impossibilité de recoller les photos pour avoir une vue complète de la piste. Ces caméras permettront de repérer les zones de faïençages légers ou les fissures légères pour aide au dépouillement sur les images INO

3. Performances des solutions envisagées.

Les estimations des performances des différentes solutions testées sont présentées dans le tableau suivant. Pour chaque type de dégradation, **il est donné le niveau de gravité à partir duquel la dégradation est estimée repérable et qualifiable**. Ce tableau a été créé à partir des indications des releveurs *VISIODEC* du Laboratoire de Rouen, suite à une enquête effectuée sur plusieurs captures d'écran des dégradations repérées sur la base 105 d'Evreux.

Concernant le système *INO LCMS*, les problèmes suivants ont aussi été exprimés :

- Il manque aux releveurs une vue d'ensemble, et une échelle des distances pour pouvoir juger de certaines dégradations, comme les faïençages ;
- La vue fusionnée est trop artificielle et risque, tout comme la fonction de zoom, de faire apparaître des défauts inexistantes ou de majorer la gravité d'une dégradation.

Pour les chaussées souples

	AIGLE RN	Caméras type IRCAN	LCMS	Caméras type IRCAN + LCMS
flache			L	L
ornière			L (testées par le LCPC)	L
déformation en W				L
gonflement-bourrelet			L	L
tassement différentiel-marche			L	L
fissure de fatigue	M	L	M	L
faïençage de fatigue	M	L	M	L
Fissure de joint	M	L	M	L
fissure de retrait	M	L	M	L
faïençage de retrait	M	L	M	L
fissure parabolique	Non testé	Non testé	M	L
Désenrobage-brûlure	Non testé	M	L	L
pelade		E	E	E
nid de poule		E	E	E
contamination-souillure	Non testé	Non testé	L*	L
dépôt de gomme		L	L	L
empreinte-poinçonnement			L	L
enrobé poreux			Non testé	
remontée d'eau		Non testé	Non testé	Non testé
remontée de fines			Non testé	
Réparation ponctuelle dégradée			Non testé	
ressuage			L	L

L : léger M : moyen E : élevé

* en rouge, les tâches difficiles à différencier entre elles
en gris, les déformations invisibles pour les caméras

Pour les chaussées rigides

	AIGLE RN	Caméras type IRCAN	LCMS	Caméras type IRCAN + LCMS
fissure	M	L	M	M
fissure en coin-cassure d'angle	Non testé	L	M	M
fracture	M	L	M	M
pompage	Non testé	Non testé	L	L
décalage-marche			L	L
épaufrure	E	L	L	L
faïencage-écaillage	M	M	M	M
défaut de joint	E	L	L	L
réparation dégradée	Non testé	Non testé	L	L
dépôt de gomme			Non testé	Non testé

L : léger M : moyen E : élevé

** en rouge, les tâches difficiles à différencier entre elles*

en gris, les déformations invisibles pour les caméras

Les solutions 5 (INO LCMS + INO LRIS) et 6 (INO LCMS + INO LRIS + IRCAN) utilisent des capteurs non testés : l'INO LRIS. Ce capteur propose une résolution transversale de 0,5 mm, et pourrait permettre de voir les fissures et faïencages d'ouvertures inférieures au millimètre, non visibles avec l'INO LCMS. Le tableau suivant propose une extrapolation des résultats obtenus par l'INO LCMS aux solutions 5 et 6 :

Pour les chaussées souples

	LRIS + LCMS	Caméras type IRCAN + LRIS + LCMS
flache	L	L
ornière	L	L
déformation en W	L	L
gonflement-bourrelet	L	L
tassement différentiel-marche	L	L
fissure de fatigue	M (L ?)	L
faïencage de fatigue	M (L ?)	L
Fissure de joint	M (L ?)	L
fissure de retrait	M (L ?)	L
faïencage de retrait	M (L ?)	L
fissure parabolique	M (L ?)	L
Désenrobage-brûlure	L	L
pelade	E	E
nid de poule	E	E
contamination-souillure	L*	L
dépôt de gomme	L	L
empreinte-poinçonnement	L	L
enrobé poreux	Non testé	Non testé
remontée d'eau	Non testé	
remontée de fines	Non testé	
Réparation ponctuelle dégradée	Non testé	
ressuage	L	L

L : léger M : moyen E : élevé (L ? : améliorations éventuelles par INO LRIS)

** en rouge, les tâches difficiles à différencier entre elles*

Pour les chaussées rigides

	LRIS + LCMS	Caméras type IRCAN + LRIS + LCMS
fissure	M (L ?)	L
fissure en coin-cassure d'angle	M (L ?)	L
fracture	M (L ?)	L
pompage	L	L
décalage-marche	L	L
épaufrure	L	L
faïençage-écaillage	M (L ?)	M
défaut de joint	L	L
réparation dégradée	L	L
dépôt de gomme	Non testé	Non testé

L : léger M : moyen E : élevé (L ? : améliorations éventuelles par INO LRIS)

** en rouge, les tâches difficiles à différencier entre elles*

4. Système de guidage.

Les performances des divers appareils sont équivalentes, mais les offres se différencient par des options qui pourront être utiles pour le projet d'IS à grand rendement, comme le système d'autoguidage du véhicule proposé par le fabricant *Trimble* avec visualisation de la trajectoire à suivre et des zones déjà auscultées.

5. Logiciel d'exploitation.

Pour améliorer le traitement des données recueillies, il est indispensable de développer un logiciel d'exploitation dédié au relevé d'IS, permettant de suivre la méthode du STAC.

On pourrait ainsi prévoir, pour les solutions basées sur le capteur INO *LCMS*, une base permettant :

- De recoller les images de chaussée obtenues lors du relevé pour reformer la piste et les taxiways ;
- De géo localiser sur cartographie toutes les dégradations relevées ;
- De tracer les mailles et de prendre en compte la méthode de calcul par maille ;
- De disposer des trois vues d'imagerie, de carte d'altitude et de vision 3D en même temps et de pouvoir les utiliser au mieux ;
- De disposer d'outils pour tracer les contours des dégradations, ainsi que d'outils de mesure de longueur et de surface ;

Des options pourraient être intégrées, donnant les possibilités :

- D'avoir un aperçu des profils longitudinaux ;
- D'avoir une vue d'ensemble de la piste ;
- De traiter les données pour améliorer le rapport signal / bruit ;
- De faire un historique sur chaque dégradation.

Les possibilités logicielles des données acquises grâce à des caméras type IRCAN sont moindres, du fait de l'angle de prise de vue, engendrant l'acquisition de portions trapézoïdales de la chaussée, ne permettant pas la reconstitution de la piste.

VIII. Possibilité d'un développement commun.

Les CECPs d'Angers et de Rouen développent les matériels mlpc® d'auscultations routières à grand rendement (AGR) en se basant sur une architecture logicielle et matérielle commune, l'APO (Architecture Porte-Outils). Cette architecture repose sur un logiciel dit « Superviseur » qui interagit avec des « sous-systèmes » correspondant aux fonctions de mesure. Un des avantages de ce concept est de limiter les temps et coûts de développement ; seules les fonctionnalités propres aux capteurs nouvellement mis en œuvre sont à développer ; en effet, les fonctions communes type acquisition de la distance, saisie (topage) d'événements, acquisition GPS, création/génération de sessions de mesures etc... existent en natif. Ainsi, l'AIGLE RN a fait l'objet d'un partenariat entre les deux CECPs pour son développement.

1. Evolution de l'AIGLE RN.

La campagne IQRN demande un planning serré d'utilisation de l'unique appareil *AIGLE RN*. Le fait de n'avoir qu'un appareil opérationnel pose aussi des problèmes en cas de panne. L'apparition d'une panne est accentuée par la charge de l'appareil : il est envisagé de changer le moteur et les suspensions de l'actuel véhicule *AIGLE RN* après trois ans d'utilisation. Ainsi, les utilisateurs demandent un second appareil pour alléger les plannings et la charge du matériel.

Parallèlement, une deuxième version de l'*AIGLE RN* est en cours de discussion. Cette nouvelle version se dirige vers l'utilisation de capteurs *INO LCMS*. Ce capteur serait utilisé pour le système d'imagerie ainsi que l'obtention de profils transversaux. Ce véhicule, pour pouvoir circuler sur route, intégrerait deux capteurs *INO LCMS* et permettrait donc de relever quatre mètres de chaussée.

2. Considérations techniques.

- Pour une utilisation routière, les performances du capteur *LCMS* donnerait sur le plan de l'imagerie des performances théoriques moindre que l'actuel *AIGLE RN* pour une vitesse de 90 km/h. Le véhicule garderait la possibilité d'acquérir les données à 20 km/h pour obtenir des résolutions millimétriques. L'utilisation de ce capteur reste donc à valider sur la route.

	AIGLE RN	INO LCMS (vitesse de 90 km/h)
Largeur de prise de vue	4 m	4 m
Résolution du profil transversal	2 mm	1 mm
Résolution longitudinale	2 mm	4,5 mm

- Le guidage n'est pas un besoin prépondérant sur route.
- Le développement sur routes demanderait d'étudier la problématique des virages. En effet, il y a perte d'informations lorsque le véhicule vire du fait de l'inclinaison du capteur linéaire. Ce problème est moindre sur pistes aéronautiques du fait du nombre limité de virages.

3. Conclusion.

Un développement commun concernant un véhicule de relevé d'IS à grand rendement et un futur *AIGLE RN 2* semble possible en ce qui concerne le développement du sous-système d'acquisition. En ce qui concerne les logiciels d'exploitation, ils pourront avoir des modules communs, notamment en ce qui concerne la visualisation des images et la saisie des dégradations. Toutefois, les besoins étant différents, il semble nécessaire de développer deux logiciels différents (recollement des images pour reconstitution de la piste, méthodologie IS, etc...).

IX. Estimation des coûts et durées.

Pour estimer les coûts et durées de développement d'un matériel de calcul d'IS à grand rendement, nous chiffrerons pour chacune des solutions proposées, les étapes de développement suivantes :

- **Établir le cahier des charges et son devis programme**, en collaboration avec le STAC ;

- **Conception** :
 - o Etude de l'aménagement général du véhicule :
 - implantation de l'hébergement des systèmes ;
 - du poste opérateur et du dispositif de supervision ;
 - des systèmes énergétiques ;
 - des éléments de sécurité ...
 - o Etude du système de guidage du véhicule :
 - étude mécanique de positionnement des antennes et des appareils de guidage ;
 - intégration du système de guidage sous APO ;
 - développement d'un logiciel de préparation des essais (parcours à suivre) ;
 - o Etude de l'implantation des capteurs :
 - études supplémentaires nécessaires (caméras type IRCAN : nature, nombre, positionnement) ou facultatives (éclairage supplémentaire) ;
 - études mécaniques de positionnement des capteurs et de leur éventuelle démontabilité ;
 - études électroniques de l'implantation des capteurs dans l'environnement APO et de l'enregistrement des données recueillies ;
 - o Développement d'un logiciel d'exploitation des données permettant la classification et la saisie des dégradations, suivant la méthode de calcul d'IS ;
 - o Tâches diverses (notice d'utilisation, notice de sécurité, passage aux mines...).

- **Fabrication** d'un véhicule fonctionnel :
 - o Coûts d'un véhicule et de son aménagement général ;
 - o Coûts du système énergétique ;

- o Coûts de l'implantation des capteurs :
 - coûts des capteurs ;
 - coûts des éléments mécaniques (structure porteuse, protections...) et du montage ;
 - coûts des éléments électroniques (ordinateurs, cartes spécifiques, câbles...) et de l'installation ;
 - coûts facultatifs (éclairage pour caméras IRCAN).
- o Coûts liés au système GPS :
 - coûts du système GPS ;
 - implantation du système GPS RTK dans le véhicule ;
 - coûts des options (dispositif de guidage automatique) et de leurs installations.
- o Tests usines.
- **Tests et validations :**
 - o Expérimentation et qualification des capteurs ;
 - o Expérimentation et qualification du logiciel d'exploitation.
- **Gestion de projet :**
 - o Participation aux réunions ;
 - o Management général.

Les coûts présentés dans les tableaux suivants donnent une appréciation générale du développement d'un appareil de relevé d'IS à grand rendement. Ils chiffrent le développement de solutions permettant une prise de vue de quatre mètres (les prix des composants sont garantis pour le mois d'octobre 2010). Les coûts supplémentaires ainsi que les contraintes d'utilisation engendrés par des versions proposant une prise de vue de huit mètres nous semblent peu justifiés au vue du temps d'occupation des pistes gagné. Ainsi, seule la solution 3 (*INO LCMS*) a été chiffrée dans cette configuration. Pour plus d'informations sur le coût de chaque tâche du développement, on pourra se reporter au chiffrage détaillé de chaque solution, disponible dans les annexes numériques. Dans tous les cas, les coûts présentés devront être réévalués en fonction des critères demandés dans un futur cahier des charges.

De plus, il faut rajouter à ces coûts l'implication du STAC dans chaque étape du développement, ainsi que la participation des spécialistes chaussées du LRPC de Rouen et du RST.

Enfin, il est présenté un rappel des performances globales et des contraintes d'utilisation liées aux choix des capteurs.

Solution 2 : Utilisation de caméra(s) couleur(s) type IRCAN.**Coûts**

	Solution 2 : caméra(s) type IRCAN		
	T9	T3	Durées
Cahier Des Charges / Devis Programme	11120	113000	3 mois
Conception	186500		18 mois
Fabrication	81271		6 mois
Tests / Validation	44945		
Gestion de projet	27800	25000	
Options diverses	162464		
Coûts (HT) et durée du projet	514 100 €	138 000 €	2,5 ans

Performances

souple	famille des déformations	
	famille des fissures	L
	famille des arrachements	M
rigide	dégradations de structure	L
	dégradation de surface	M
	dégradation de joint	L
	autres	L

Contraintes d'utilisation

vitesse en acquisition (1mm longitudinal)	20 km/h
temps d'occupation de la piste (base 105)	≈ 2 h
utilisation de nuit	à étudier

Avis du CECP :

Cette solution donne de bons résultats sur les dégradations de surface, mais ne permet pas de repérer les déformations de la chaussée. Des études supplémentaires s'avèrent nécessaires pour décider de la caméra à utiliser, du nombre de caméras à intégrer ainsi que de leurs positionnements, et pour une utilisation de nuit des caméras couleurs. Les possibilités logicielles seront aussi restreintes.

C'est aussi la solution la moins onéreuse, du fait du faible coût des capteurs utilisés.

Solution 3 : INO LCMS (2 capteurs).**Coûts**

	Solution 3 : INO LCMS (2 capteurs)		
	T9	T3	Durées
Cahier Des Charges / Devis Programme	11120	244000	3 mois
Conception	253185		24 mois
Fabrication	75058,5		6 mois
Tests / Validation	69155		
Gestion de projet	27800	5000	
Options diverses	132539		
Coûts (HT) et durée du projet	568 858 €	249 000 €	3 ans

Performances

souple	famille des déformations	L
	famille des fissures	M
	famille des arrachements	L
rigide	dégradations de structure	M
	dégradation de surface	M
	dégradation de joint	L
	autres	L

Contraintes d'utilisation

vitesse en acquisition (1mm longitudinal)	20 km/h
temps d'occupation de la piste (base 105)	≈ 2 h
utilisation de nuit	oui

Avis du CECP :

Cette solution permet de voir l'ensemble des dégradations présentes sur les pistes aéronautiques. Néanmoins, les fissures et faïençages de niveau léger ne sont pas tous repérables avec les capteurs *INO LCMS*.

Solution 3 : INO LCMS (4 capteurs).**Coûts**

	Solution 3 : INO LCMS (4 capteurs)		
	T9	T3	Durées
Cahier Des Charges / Devis Programme	11120	400000	3 mois
Conception	294655		30 mois
Fabrication	92851		6 mois
Tests / Validation	69155		
Gestion de projet	27800	5000	
Options diverses	132539		
Coûts (HT) et durée du projet	628 120 €	405 000 €	3,5 ans

Performances

souple	famille des déformations	L
	famille des fissures	M
	famille des arrachements	L
rigide	dégradations de structure	M
	dégradation de surface	M
	dégradation de joint	L
	autres	L

Contraintes d'utilisation

vitesse en acquisition (1mm longitudinal)	20 km/h
temps d'occupation de la piste (base 105)	≈ 1 h
utilisation de nuit	oui

Avis du CECP :

Cette solution permet de voir l'ensemble des dégradations présentes sur les pistes aéronautiques. Néanmoins, les fissures et faïençages de niveau léger ne sont pas tous repérables avec les capteurs *INO LCMS*.

Cette solution à quatre capteurs ne nous semble pas apporter d'avantages suffisants au vu de l'augmentation du coût de développement.

Solution 4 : INO LCMS (2 capteurs). + caméra(s) couleur(s) type IRCAN.**Coûts**

	Solution 4 : INO LCMS (2 capteurs) + caméra(s) type IRCAN		
	T9	T3	Durées
Cahier Des Charges / Devis Programme	11120		3 mois
Conception	278515		24 mois
Fabrication	108253,5	269000	6 mois
Tests / Validation	77225		
Gestion de projet	27800		
Options diverses	162464	25000	
Coûts (HT) et durée du projet	665 378 €	294 000 €	3 ans

Performances

souple	famille des déformations	L
	famille des fissures	L
	famille des arrachements	L
rigide	dégradations de structure	L
	dégradation de surface	M
	dégradation de joint	L
	autres	L

Contraintes d'utilisation

vitesse en acquisition (1mm longitudinal)	20 km/h
temps d'occupation de la piste (base 105)	≈ 2 h
utilisation de nuit	Oui (à étudier pour les caméras couleurs)

Avis du CECP :

Cette solution s'avère être un bon compromis. Elle permet de voir toutes les dégradations (seuls les faïençages très légers sur chaussées rigides posent problèmes). Des études supplémentaires s'avèrent nécessaires pour décider de la caméra à utiliser, du nombre de caméras à intégrer ainsi que de leurs positionnements, et pour une utilisation de nuit des caméras couleurs.

Solution 5 : INO LCMS + INO LRIS (2 capteurs).**Coûts**

	Solution 5 : INO LCMS + INO LRIS (2 capteurs)		
	T9	T3	Durées
Cahier Des Charges / Devis Programme	11120		3 mois
Conception	312920		30 mois
Fabrication	102041	365000	6 mois
Tests / Validation	101435		
Gestion de projet	27800		
Options diverses	132539	5000	
Coûts (HT) et durée du projet	687 855 €	370 000 €	3,5 ans

Performances

souple	famille des déformations	L
	famille des fissures	L ?
	famille des arrachements	L
rigide	dégradations de structure	L ?
	dégradation de surface	L ?
	dégradation de joint	L
	autres	L

Contraintes d'utilisation

vitesse en acquisition (1mm longitudinal)	20 km/h
temps d'occupation de la piste (base 105)	≈ 2 h
utilisation de nuit	Oui

Avis du CECP :

Cette solution possède des capteurs qui n'ont pas été testés (*INO LRIS*). Ces capteurs promettent une meilleure résolution d'image (0,5 mm en transversal), qui pourrait permettre de repérer les fissures et faïençages légers non visibles par l'*INO LCMS*.

Il s'avèrerait nécessaire de tester les capteurs INO LRIS avant de valider cette solution. Cette solution s'avèrerait au final plus coûteuse que la solution 4 (*INO LCMS* + caméras couleurs type IRCAN), mais pourra être utilisée de nuit sans éclairage supplémentaire.

Solution 6 : INO LCMS + INO LRIS (2 capteurs) + caméra(s) couleur(s) type IRCAN.**Coûts**

Solution 6 : INO LCMS + INO LRIS (2 capteurs) + caméra(s) type IRCAN			
	T9	T3	Durées
Cahier Des Charges / Devis Programme	11120		3 mois
Conception	338250		30 mois
Fabrication	135236	390000	6 mois
Tests / Validation	109505		
Gestion de projet	27800		
Options diverses	162464	25000	
Coûts (HT) et durée du projet	784 375 €	415 000 €	3,5 ans

Performances

souple	famille des déformations	L
	famille des fissures	L
	famille des arrachements	L
rigide	dégradations de structure	L
	dégradation de surface	L ?
	dégradation de joint	L
	autres	L

Contraintes d'utilisation

vitesse en acquisition (1mm longitudinal)	20 km/h
temps d'occupation de la piste (base 105)	≈ 2 h
utilisation de nuit	Oui (à étudier pour les caméras couleurs)

Avis du CECF :

Cette solution embarque tous les types de capteurs. Le capteur INO LRIS n'a pas été testé. Cette solution ne nous semble pas être la plus pertinente, mais devrait permettre de repérer et qualifier toutes les dégradations. Cependant, elle induirait des difficultés supplémentaires à l'intégration des nombreux capteurs sur un même porteur.

X. Conclusion.

La présente étude permet d'envisager plusieurs technologies pouvant être utilisées pour le relevé d'Indice de Service à grand rendement, proposant chacune des performances et des inconvénients propres. Il convient maintenant au STAC de choisir une des solutions présentées à partir des bilans et de l'estimation des coûts réalisés.

Si la politique du STAC conduit à retenir une des solutions présentées, nous proposons la constitution d'une équipe-projet comprenant :

- o L'équipe de développement matériel, formée du personnel du CECF de Rouen et du CECF d'Angers ;
- o Des experts chaussées du STAC, du Laboratoire Régional de Rouen et du RST, des spécialistes de l'imagerie appartenant au RST, pour valider les choix réalisés ;
- o Des formateurs et releveurs IS du STAC, complétés éventuellement par d'autres utilisateurs de cette méthode (SNIA ...) ainsi que des gestionnaires d'aéroports sélectionnés par le STAC pour la rédaction du CDCF.

Le premier travail d'une partie de cette équipe consistera à rédiger un cahier des charges fonctionnel adapté aux besoins du STAC et des gestionnaires d'aéroports. C'est à partir de ce Cahier Des Charges Fonctionnel qu'un devis-programme précis, qui servira de support à l'avancement du projet, pourra être rédigé.



service technique de l'Aviation civile

CS 30012

CETE Normandie Centre
10 Chemin de la Poudrière
76121 Le Grand-Quevilly cedex
téléphone : 02 35 68 81 00

31, avenue du Maréchal Leclerc
94385 BONNEUIL-SUR-MARNE CEDEX
Tél. 33 (0) 1 49 56 80 00
Fax 33 (0) 1 49 56 82 19

Site de Toulouse
9, avenue du Docteur Maurice Grynfolgel - BP 53735
31037 TOULOUSE CEDEX
Tél. 33 (0) 1 49 56 83 00
Fax 33 (0) 1 49 56 83 02

Centre de test de détection d'explosifs
Centre d'essais de lancement de missiles - BP 38
40602 BISCARROSSE CEDEX
Tél. 33 (0) 5 58 83 01 73
Fax 33 (0) 5 58 78 02 02