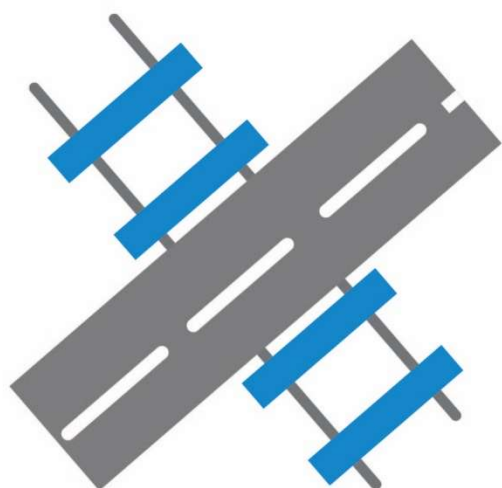


INNOVATION & RECHERCHE

Projet Carrefour Intelligent

Rapport R2 du rapport de Millas- BEATT



SOMMAIRE

<i>I. CONTEXTE</i>	3
<i>II. LE PROJET CARREFOUR INTELLIGENT</i>	3
<i>III. LES DEVELOPPEMENTS</i>	3
<i>A. GENERALITES</i>	3
<i>B. DEFINITION DES DIFFERENTS ETATS DU PN</i>	4
<i>C. LA SOLUTION TECHNIQUE EN ITS G5 OU LTE (3G/4G)</i>	4
<i>D. EXEMPLE DE CALCUL DE L'EQUATION DE FERMETURE DU PN (FERM) POUR UN PN SUR DOUBLE VOIE</i>	7
<i>IV. LES EXPERIMENTATIONS</i>	8
<i>V. CONCLUSION</i>	13

I. CONTEXTE

Suite à la collision survenue au passage à niveau de Millas le 14 décembre 2017, le BEATT a demandé à SNCF Réseau

R2 « Dans le cadre des évolutions des véhicules connectés, étudier la faisabilité d'un report d'alerte de fermeture des passages à niveau à l'intérieur des véhicules couplés avec le système GPS et la cartographie embarquée. »

II. LE PROJET CARREFOUR INTELLIGENT

L'avènement des nouveaux systèmes de transports intelligents connectés (C-ITS), notamment via l'arrivée des véhicules connectés et plus tard des véhicules autonomes, offre de nouvelles solutions pour sécuriser les routes. Ces solutions sont d'autant plus intéressantes, en fonction des différentes projections, que le nombre de véhicules connectés croît fortement à partir de 2020 et que le nombre de véhicules automatisés va augmenter progressivement à partir de 2025.

Au niveau européen, différents projets tels que [Intercor](#), [C Roads](#), et récemment avec [Indid](#) sont actuellement en cours de réalisation par les *états membres et par des opérateurs routiers visant à tester et à mettre en œuvre des services C-ITS de communication*. Les messages échangés sont bidirectionnels *entre les véhicules connectés eux-mêmes et entre les véhicules et l'infrastructure* en ITS- G5 (wifi 802.11p) sur la bande de fréquence 5,9 GHz et en cellulaire (3G/4G). *L'un des objectifs de ces projets est d'aboutir à une harmonisation et une interopérabilité transfrontalière.*

À ce titre, depuis octobre 2017, la direction Innovation et Recherche de SNCF a lancé le projet « [Carrefour Intelligent](#) ».

III. LES DEVELOPPEMENTS

A. GENERALITES

Un passage à niveau automatique est composé de demi-barrières, de feux, et de sonneries. Ces équipements sont mis en œuvre par l'approche d'un train au travers du changement d'état de divers relais électriques et capteurs qui répondent aux normes de sécurité les plus élevées (SIL4).

Jusqu'à ce jour, certaines informations du passage à niveau sont déjà définies par l'état d'un ou plusieurs relais et capteurs pour transmettre des alarmes vers le mainteneur et éventuellement vers l'exploitant (nombre de feux éteints, barrière brisée, ...) grâce à un équipement de télésurveillance. Cependant, la télésurveillance, dans son utilisation actuelle, n'est exploitable qu'en interne pour délivrer des alarmes et n'est pas destinée à communiquer avec des systèmes externes tels que des véhicules routiers.

Le système de PN connecté envisagé prend en compte tous les éléments constitutifs du fonctionnement du passage à niveau en automatique et en manuel (gardiennage provisoire par exemple).

Actuellement, aucun système n'existe selon les standards ETSI et en transmission ITS G5 et LTE (3G/4G) entre un passage à niveau et un véhicule routier. Concernant le niveau de sécurité,

pour les véhicules connectés, il faut considérer cet équipement comme une aide à la conduite, au même titre que l'ABS, la vitesse stabilisée ou autres équipements des véhicules.

En cas de défaillance du système, le conducteur ne reçoit plus les informations et il doit se comporter comme sur tout PN non équipé. Il n'est pas possible d'avoir le même niveau de sécurité que l'installation elle-même, du fait du système de transmission.

Quand bien même le système atteindrait un niveau de sécurité plus élevé, dans le véhicule connecté, c'est toujours le conducteur qui est responsable de la conduite de son véhicule et même s'il a des informations restrictives, rien ne pourra l'empêcher de franchir frauduleusement un passage à niveau fermé.

Dans le futur, ce niveau de sécurité devra évoluer vis-à-vis des véhicules autonomes pour qu'ils puissent tenir compte des états des différents PN rencontrés et s'arrêter, ralentir ou changer d'itinéraire en cas d'information restrictive.

B. DEFINITION DES DIFFERENTS ETATS DU PN

Le passage à niveau a plusieurs états de fonctionnement :

- PN « en mode nominal » : pas de circulation ferroviaire, le PN est ouvert,
- PN fermé : arrivée imminente d'une circulation ferroviaire et franchissement du PN dès le déclenchement de l'annonce,
- PN en dérangement : un des constituants du passage à niveau est défaillant (barrière brisée, feu éteint, ...),
- PN en travaux : le plan de roulement routier pour franchir le PN n'est plus fonctionnel.

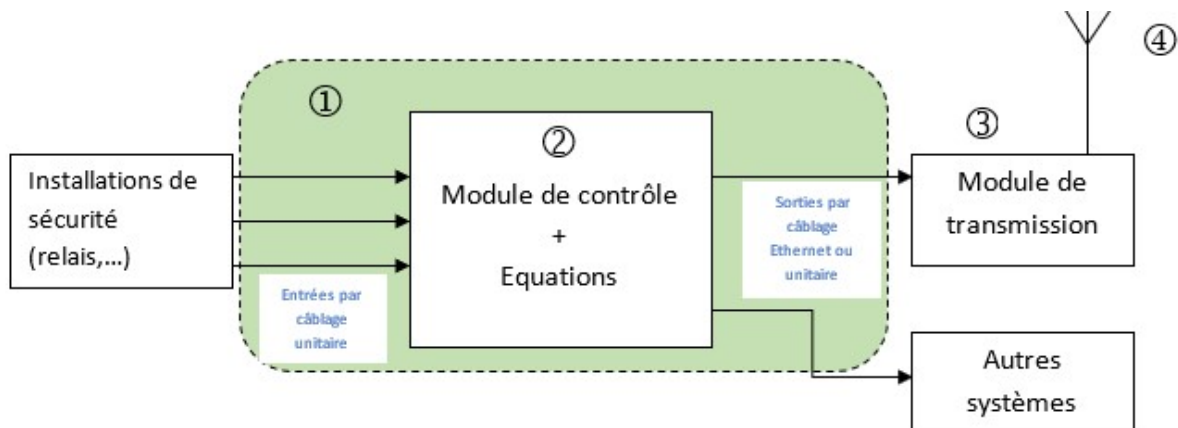
Les états de dysfonctionnement sont différenciés selon que le PN est en mode automatique ou en mode gardiennage provisoire. Dès que le garde prend la main sur l'installation (pour gérer un défaut tel qu'un bris de barrière par exemple), la situation de dérangement disparaît. C'est par les actions du garde sur l'installation que le PN enverra les informations « PN ouvert » ou « PN fermé ».

Un module de contrôle (acquisition de données) récupère l'état des différents relais de commande du passage à niveau et l'état des différents constituants du PN. Différents algorithmes sont appliqués pour obtenir l'état du PN. Les équations qui en découlent sont traitées en logique booléenne, avec tables de vérité. La simplification des équations résultantes met en œuvre les lois de De Morgan.

Ces informations sont transmises au module de transmission pour encodage selon les standards de l'ETSI. Une fois encodés, les messages sont envoyés en ITS G5 et/ou en LTE vers des véhicules routiers équipés spécifiquement pour être connectés/automatisés.

C. LA SOLUTION TECHNIQUE EN ITS G5 OU LTE (3G/4G)

Dans le dessin ci-dessous, les numéros renvoient à des repères dans le texte qui suit



Les différents éléments du système :

Les entrées sont câblées directement sur les installations de sécurité (relais, commutateurs,...) sur des contacts libres de relais ou par l'intermédiaire de capteurs à effet Hall (en l'absence de contact libre), plus généralement sur tous les éléments permettant de composer les équations définissant les divers états du passage à niveau.

Les guérites de signalisation sont équipées d'un système complémentaire de protection contre les champs magnétiques.

Le câblage : ① (Fig 1)



Bornier de câblage intermédiaire ① (en provenance des relais et autres composants et vers les connecteurs du module de contrôle)

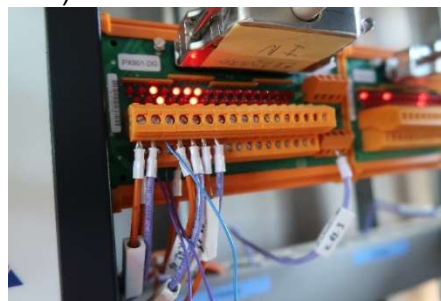


Fig 2 Connecteurs du module de contrôle ① (câblage entre le bornier intermédiaire et du module de contrôle)

Le module de contrôle (et les équations intégrées) ②

Le module de contrôle est du même niveau de sécurité que la télésurveillance. Les équations basées sur les états logiques des entrées sont écrites en langage Python.

Il se substitue aux équipements de télésurveillance lorsque toutes les conditions pour installer une télésurveillance classique ne sont pas réunies (ligne non équipée en télésurveillance, budget d'équipement non pertinent,...). Dans le cas où la télésurveillance existe, un complément d'installation peut être fait pour que la télésurveillance se substitue au module de contrôle.

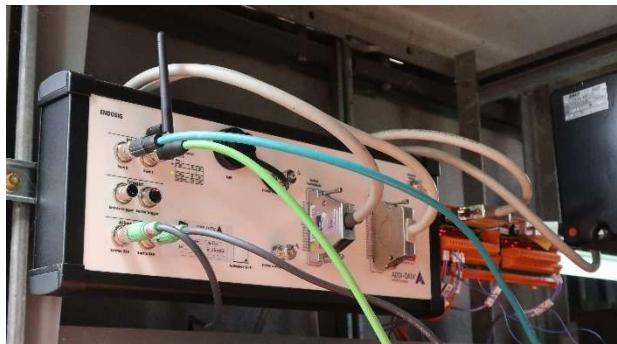


Fig 3 Le module de contrôle ② A droite en orange : bornier des entrées et bornier des sorties
Les câbles vert et bleu sont des liaisons Ethernet

Ces informations sont transmises au module de transmission pour encodage selon les standards de l'ETSI sous forme de messages DENM actuellement (pour l'état du PN) et IVI pour les caractéristiques du PN.

Le module de transmission : ③ fig 4



Le module de transmission envoie les messages en ITS G5 et/ou en LTE pour un affichage sur un support type tablette ou tableau de bord dans le véhicule connecté à partir d'antennes ④

Les antennes ④ : les antennes sont nécessairement extérieures pour garantir un bon fonctionnement lors de l'envoi des messages (et éviter l'effet cage de Faraday des guérites métalliques) et pour assurer une démonstration de l'immunité quant au champs rayonnés sur les installations de sécurité.



Fig 5

Informations sur les équations logiques :

Pour déterminer les différentes équations logiques, il est nécessaire de fixer des conventions de fonctionnement sur les différents éléments composant les entrées :

Etat des relais :

- relais excité : état 1
- relais désexcité : état 0

Etat des commutateurs :

- commutateur au repos : état 0
- commutateur activé : état 1

Pour les sorties, ce sont les combinaisons de l'état des entrées sous forme d'équations logiques qui fournissent les différents états du passage à niveau à envoyer vers le module de transmission.

Les états de chaque entrée sont convertis en état logique (0 ou 1). La combinaison de ces différents états logiques sont assemblés dans des tables de vérité. Chaque table de vérité correspond :

- à une fonction intermédiaire (gardiennage provisoire, Fermeture,...),
- à un assemblage de fonctions intermédiaires,
- à un assemblage d'entrées,
- à une combinaison d'entrées et/ou de fonctions intermédiaires.

L'équation résultante prend en compte tous les états à 1 de la table de vérité.

D. EXEMPLE DE CALCUL DE L'EQUATION DE FERMETURE DU PN (FERM) POUR UN PN SUR DOUBLE VOIE

Quand un PN en fonctionnement automatique se ferme normalement (CSR bas = 0), il est dépendant des informations d'annonces et zones courtes PN (il faut au moins une information = 0) et de la position du CmCSR (CmCSR utilisé = 1 entraîne le CSR = 0).

	RG	CSR	AnV1	AnV2	ZPNV1	ZPNV2	Ferm
0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	0	0	0	1	1
2	0	0	0	0	1	0	1
3	0	0	0	0	1	1	1
4	0	0	0	1	0	0	1
5	0	0	0	1	0	1	1
6	0	0	0	1	1	0	1
7	0	0	0	1	1	1	1
8	0	0	1	0	0	0	1
9	0	0	1	0	0	1	1
10	0	0	1	0	1	0	1

Extrait d'équation de fermeture

L'équation finale simplifiée est :

$$\text{Ferm} = \overline{\text{CSR}} * (\text{RG} + \overline{\text{AnV1}} + \overline{\text{AnV2}} + \overline{\text{ZPNV1}} + \overline{\text{ZPNV2}}) + (\overline{\text{RG}} * \text{CSR}) * (\overline{\text{AnV1}} + \overline{\text{AnV2}} + \overline{\text{ZPNV1}} + \overline{\text{ZPNV2}})$$

Paramétrage des algorithmes :

L'ensemble des algorithmes des états du passage à niveau est programmé en langage Python et transférés dans le module de contrôle.

```

295  ## Equations des sorties sur l'etat du PN
296  # PN ouvert
297  # partie facultative retirée avant Ouv_Auto dans S0 : (not Ferm_Auto_Moins10) & (not
Ferm_Auto_Plus10)) &
298  o[0] = (Ouv_Auto | Ouv_Man) & (not Def_CBr_Pre) & (not Def_CBr_Ouv) & (not
Def_KBrO) & (not Def_Ferm_Br) & (not Def_Bris) & (KBrO | RG) & (not Def_Ferm1) &
(not Def_Ferm2) & (not Etat_Tx) | (Fus_Divers_HS & CSR & (not Fus_CSR_HS))
299  # PN fermé
300  o[1] = ((Ferm_Auto_Moins10 & (not Ferm_Auto_Plus10)) | ((Ferm_Auto_Moins10 |
(not Ferm_Auto_Plus10)) & ((not KBrO) & (not RG)))) | Ferm_Man) & (not
Def_CBr_Pre) & (not Def_CBr_Ouv) & (not Def_KBrO) & (not Def_Ferm_Br) & (not
Def_Lampes) & (not Def_Bris) & (not Def_Ferm1) & (not Def_Ferm2) & (not Etat_Tx)
| (Fus_Divers_HS & (not CSR) & (not Fus_CSR_HS))#& (not Ferm_Auto_Def)

```

Extrait du programme

IV. LES EXPERIMENTATIONS

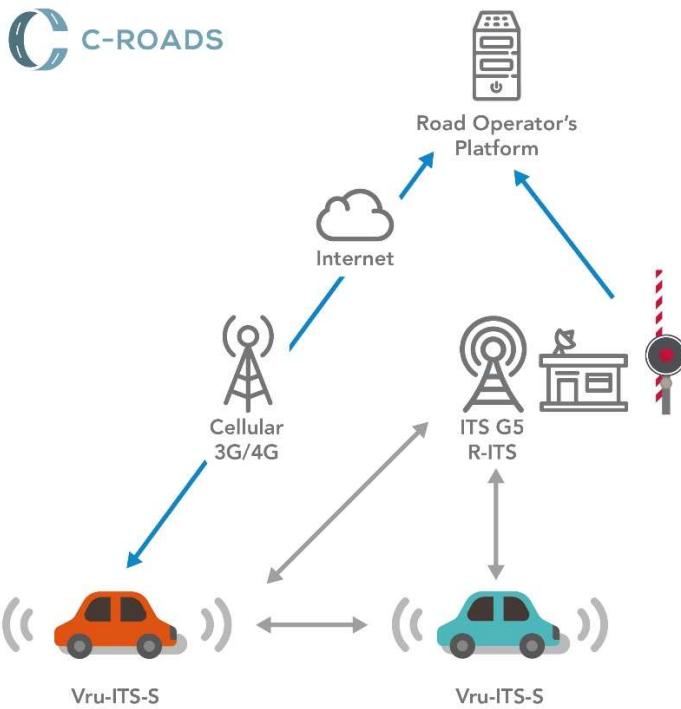
En novembre 2018, un premier prototype a été développé et testé sur un site existant en ITS G5 en partenariat avec l'équipementier automobile Valeo afin de démontrer la faisabilité de communications entre un passage à niveau et un véhicule connecté.

Sur le site de Saint-Jory, les tests de portée des messages transmis depuis le passage à niveau ont démontré que le véhicule les reçoit jusqu'à 670 mètres en ligne droite (une perte de signal a été observée à 670 mètres en raison de guérites techniques le long de route) et jusqu'à 250 mètres en courbe avec obstacles (bâtiment, trains garés) avec une latence inférieure à 300 millisecondes.



Fig 6 et 7 Illustration des portées G5 sur le site de Saint Jory avec Valeo

En 2019 des développements complémentaires ont été réalisés sur le prototype afin de le rendre compatible avec l'architecture européenne C-Roads en ITS G5 et en transmission cellulaire.



Architecture C Roads

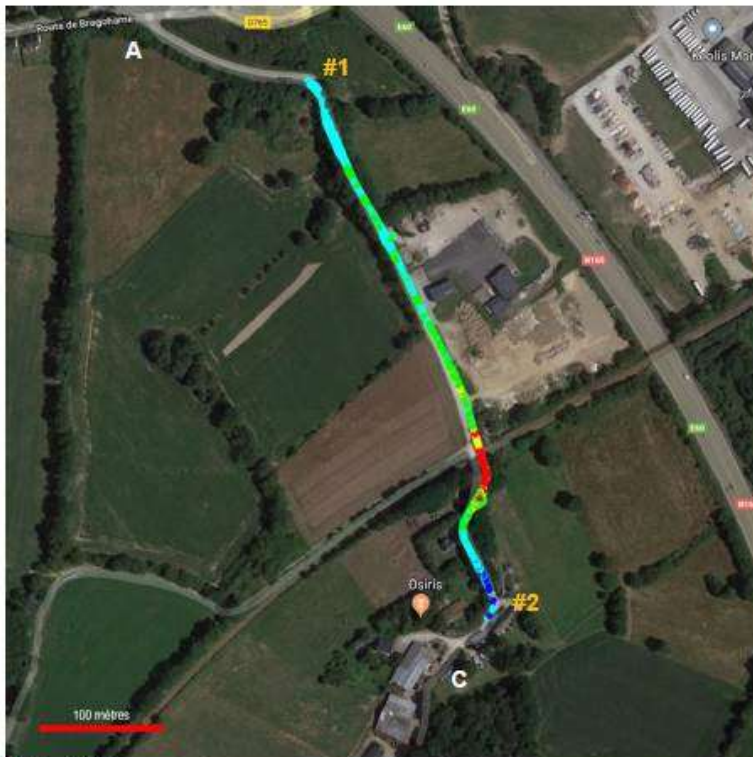
Différents tests de validation ont été réalisés avec succès en septembre 2019 avec un équipementier automobile sur le PN 449 de Brec'h.

Propriété exclusive de SNCF, toute reproduction ou représentation interdite

Projet Carrefour Intelligent Rapport R2 du rapport de Millas- BEATT



Portée en ITS G5: 280 mètres chemin 1 et 80 mètres chemin 2
Portée possible en 4G: Plusieurs centaines de mètres voire 1km
Latence : < 300 ms



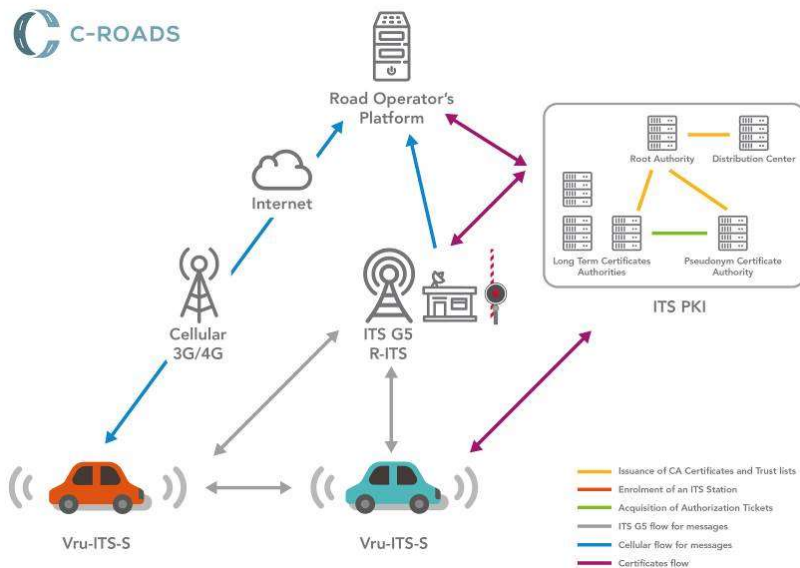
- >= -60 dBm
- < -60 dBm & >= -75 dBm
- < -75 dBm & >= -85 dBm
- < -85 dBm & >= -95 dBm
- < -95 dBm & >= -100 dBm
- < -100 dBm



Exemple d'affichage de message PN IHM Yogoko

Propriété exclusive de SNCF, toute reproduction ou représentation interdite

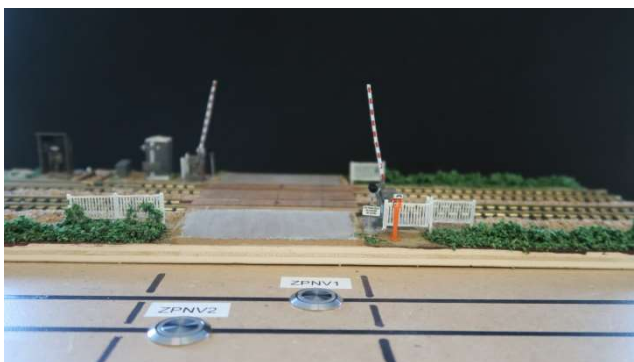
De nouveaux développements ont été réalisés en 2020 pour intégrer, dans le prototype, la couche cybersécurité de la norme ETSI et les exigences européennes de la Directive 2010/40/UE du 7 juillet 2010 et l'acte délégué du 13/3/2019 afin d'aboutir à une harmonisation et une interopérabilité transfrontalière



Architecture C Roads avec PKI

Afin de faciliter la préparation des tests sur site, un banc d'essais a été conçu pour les tests unitaires. Il se compose d'une maquette de passage à niveau à l'échelle HO (1/87°) avec un équipement électrique similaire à un passage à niveau réel. Cette maquette permet la simulation des passages de trains avec possibilité de générer des dérangements des installations. Elle est interfacée avec un module de contrôle afin de fournir les différents états du passage à niveau. Un module de transmission est connecté au module de contrôle. Il permet d'encoder les messages et de les émettre par le biais des antennes G5 et 4G.

Des tests unitaires ont été réalisés en juillet et en août avec succès pour valider la conception des messages, l'intégration de la cybersécurité et la gestion des certificats sur la maquette reprenant un passage à niveau au format HO.



Maquette PN format HO

Par la suite, des tests de chaîne complète ont été réalisés sur le passage à niveau 449 de Brec'h et ont permis de valider le dispositif en septembre 2020 avec le fournisseur Neo GLS

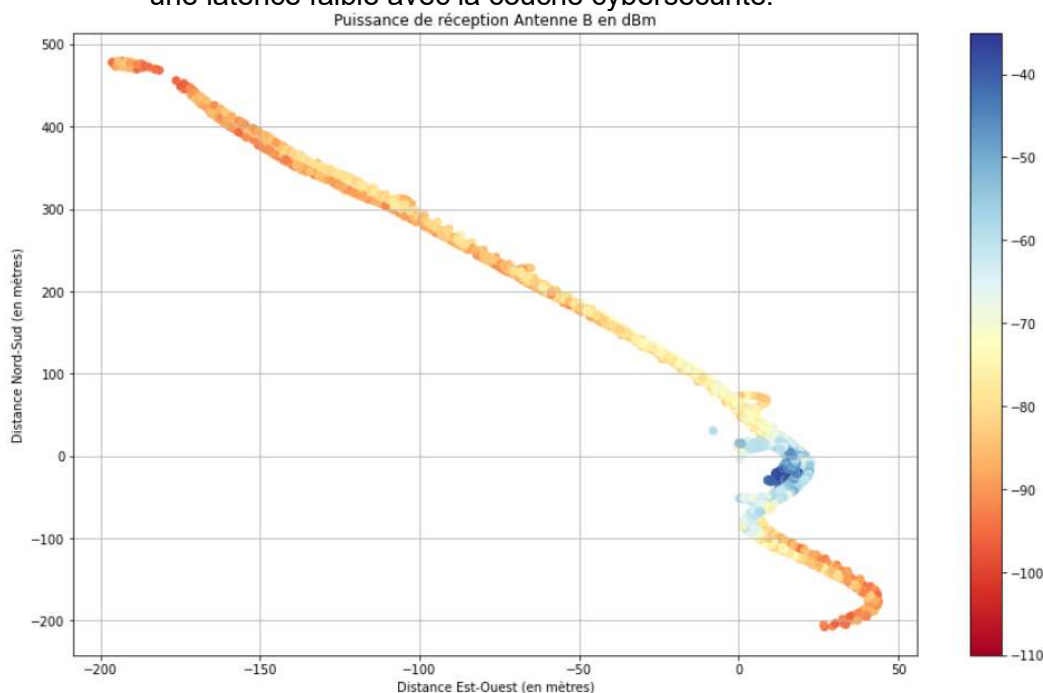


NeoGLS

Exemple d'affichage de message PN IHM

Les tests réalisés en 2020 ont permis d'observer :

- une amélioration de la portée en wifi (G5) en forte courbe 350 m.
- une latence faible avec la couche cybersécurité.



En complément des tests virtuels européens ont été réalisés en novembre 2020 et mars 2021 interopérabilité validée avec les partenaires européens C-Roads.

SNCF a proposé auprès de l'ETSI la normalisation de ces cas d'usages au catalogue, le processus est en cours d'étude.

Le projet Carrefour Intelligent a lancé une nouvelle réflexion sur la communication avec les véhicules autonomes en lien avec les équipes Véhicules Autonomes de la DGITM et avec Valeo, des expérimentations sont actuellement en cours.

V. CONCLUSION

Le projet a pu démontrer la faisabilité technique de rendre le passage à niveau communiquant avec un véhicule routier.