



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et
de la communication DETEC

Office fédéral des transports (OFT)

Programme de mise en œuvre de la stratégie énergétique 2050
des transports publics (SETP 2050)

Expériences tirées de l'évaluation des vitrages isolants thermiques gravés au laser comme substitut aux amplificateurs dans les véhicules ferroviaires

P-135: Rapport final

Markus Förster

CFF SA

Voyageurs, Développement du matériel roulant Grandes lignes

Wylersstrasse 123, 3000 Berne 65

markus.foerster@sbb.ch, www.cff.ch

Johannes Estermann

CFF SA

Voyageurs, Programme d'économie d'énergie

Wylersstrasse 125, 3000 Berne 65

johannes.estermann@sbb.ch, www.cff.ch

Comité consultatif

OFT: Tristan Chevroulet, Daniel Schaller (PO)

Mentions légales

Éditeur:

Office fédéral des transports OFT

Programme de mise en œuvre de la Stratégie énergétique 2050 des transports publics (SETP 2050)

CH-3003 Berne

Chef de programme

Tristan Chevroulet, OFT

Numéro du projet: 135

Commande

disponible gratuitement sur Internet

www.oft.admin.ch/energie2050

Les auteurs du présent rapport sont seuls responsables de son contenu et de ses conclusions.

Berne, le 18 mai 2020

Table des matières

Résumé.....	4
1. Situation initiale	5
2. Objectif du travail.....	6
3. Stratégie de recherche et connaissances actuelles.....	6
4. Résultats	6
4.1. Propriétés des vitrages HF	6
4.1.1. Campagne de mesures IC 2000 des 20 et 21 juin 2017 et diverses mesures complémentaires	7
4.1.2. Courses de mesures IC 2000 par le Groupe P3 (3 et 6 novembre 2017)	8
4.1.3. Courses de mesures Domino (15 décembre 2017)	9
4.1.4. Courses de mesures ICN (25 août 2018).....	10
4.1.5. Mesures des vitres en série finales sur l'IC 2020 – véhicule pilote (8 mai 2019)	10
4.2. Climatisation et consommation d'énergie.....	11
4.2.1. Structure du verre aux CFF	11
4.2.2. Comparaison des valeurs thermophysiques	11
4.3. Acceptation des vitrages traités au laser.....	13
4.4. Coûts du cycle de vie	14
4.4.1. Mandat à Gestion du cycle de vie des CFF	14
4.4.2. Variantes considérées pour la modernisation de l'IC 2020.....	14
4.4.3. Paramètres des vitrages – vue d'ensemble	16
4.4.4. Coûts énergétiques	16
4.4.5. Résultats qualitatifs et quantitatifs de l'analyse LCC.....	17
4.4.6. Recommandation et motivation.....	18
4.5. Situation actuelle sur le marché et exploitants ferroviaires utilisant des vitrages HF ...	19
5. Conclusions et recommandations	19
Liste des symboles et abréviations.....	20
Annexes.....	20

Résumé

Sur la base d'exemples de «bonnes pratiques», ce projet résume les expériences tirées par les CFF de l'évaluation des vitrages isolants thermiques gravés au laser (ci-après «vitrages HF») qui se sont révélés être un substitut aux amplificateurs radio mobiles (ci-après «répéteurs») des flottes du trafic grandes lignes et du trafic régional. Les nombreuses mesures (comparatives) réalisées avec les prestataires de téléphonie mobile sur différents tronçons de ligne et avec différents types de véhicules montrent que les résultats obtenus avec les vitrages HF sont similaires, voire meilleurs que ceux obtenus avec les répéteurs dans les bandes de fréquences actuelles (800-2600 MHz). Pour ce qui est de l'impact sur la climatisation des véhicules, on constate que les vitrages testés entraînent une perte énergétique plus élevée que les vitrages classiques. Mais si l'on prend en compte la consommation énergétique globale, la suppression des répéteurs qui consomment également de l'énergie permet de compenser ces pertes. Du point de vue du cycle de vie des produits, les vitrages permettent d'obtenir de meilleurs résultats que les répéteurs puisque les coûts d'investissement et de maintenance sont nettement plus faibles. Les dépenses supplémentaires pour le traitement laser des vitrages HF (de 20% à 50% en fonction du fabricant et du type de vitrage) ont un impact limité sur l'évaluation. Compte tenu du manque d'expérience à long terme, il est encore difficile de dire avec précision comment vont vieillir les vitrages HF. Des garanties supplémentaires seront demandées aux fournisseurs dans le cadre de la procédure d'appel d'offres pour compenser ce risque résiduel. Du point de vue des clients, il faut tendre à une structure laser aussi fine et discrète que possible. Selon l'étude de marché qualitative réalisée, les voyageurs estiment que les nouveaux vitrages sont à peine gênants. Au regard des informations recueillies, les CFF privilégieront les vitrages gravés au laser plutôt que les répéteurs dans les futurs projets d'acquisition et de modernisation.



Illustration 1: composition IC 2000 avec vitrages HF (haute fréquence).

1. Situation initiale

La solution de téléphonie mobile qui est utilisée actuellement dans les trains CFF est sous l'influence de deux grands facteurs. Eu égard à la hausse constante du nombre de nouvelles voitures et de nouveaux trains depuis le milieu des années 1990, le matériel roulant en circulation est presque toujours climatisé. Par ailleurs, parallèlement au développement de la téléphonie mobile, le besoin d'une réception mobile de bonne qualité à bord des trains a vu le jour chez les clients.

La conception des caisses de voitures et la mise en place de fenêtres équipées d'un revêtement métallisé de protection solaire dans les véhicules climatisés offrent un blindage électromagnétique comparable à une cage de Faraday. Il en résulte une nette diminution de la réception mobile à l'intérieur des voitures et, partant, une détérioration de l'expérience de téléphonie mobile des utilisateurs.

Depuis la fin des années 1990, les CFF collaborent étroitement avec le consortium InTrainCom, qui regroupe les opérateurs Salt, Sunrise et Swisscom. Les CFF et InTrainCom se sont engagés à améliorer la réception mobile dans les trains. La solution mise en œuvre s'appuie sur l'installation d'amplificateurs de signaux (répéteurs) qui percent la cage de Faraday et permettent aux clients de profiter dans les trains de la bonne couverture de réseau.

Lancé au début des années 2000, le déploiement de cette solution s'avère néanmoins cher et fastidieux, et nécessite des adaptations permanentes aux nouveaux standards mobiles (2G, 3G, 4G et 5G) et à la réorganisation des fréquences. Sur fond d'avancées technologiques ininterrompues, les clients exigent des débits toujours plus rapides et, partant, une amélioration perpétuelle de la performance des répéteurs. Cette dynamique, associée à la rapide évolution des cycles de vie des produits de la téléphonie mobile, représente un enjeu grandissant pour les CFF, dont plus de 4000 caisses de voitures doivent être modifiées: retrait des véhicules, durées d'immobilisation prolongées, hausse du poids et du besoin énergétique des répéteurs, coûts, etc.

Évolution de la téléphonie mobile et acquisition / modernisation du matériel roulant.

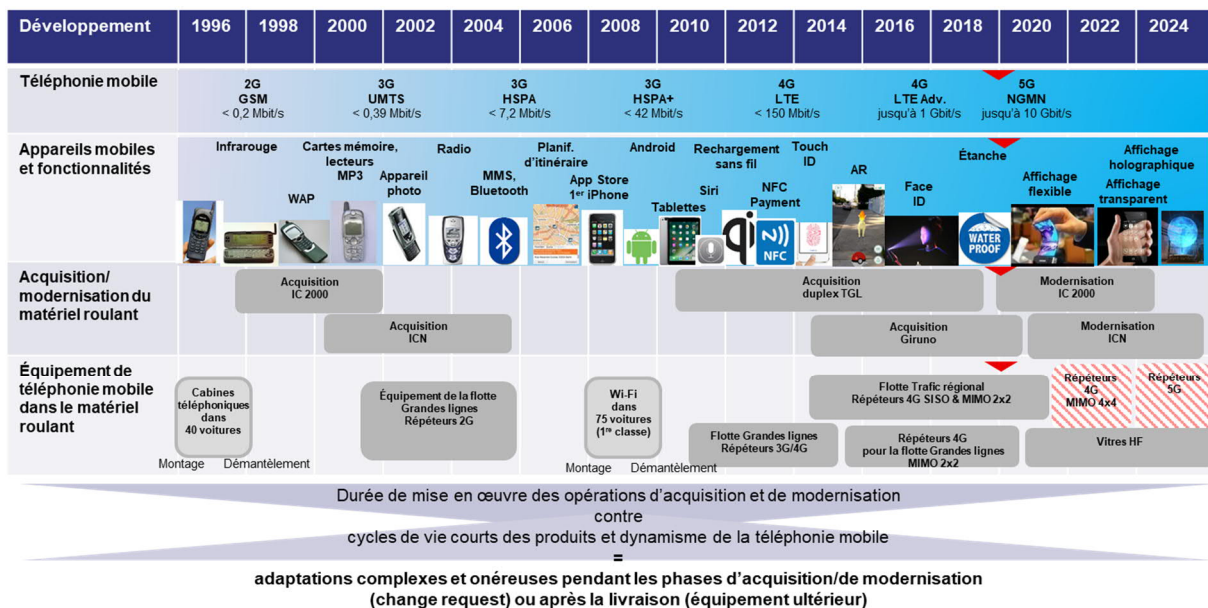


Illustration 2: source CFF.

L'annonce des premiers tests réalisés (en laboratoire) par Siemens Wien, l'EPFL et Swisscom sur des vitrages laissant passer les ondes a éveillé l'intérêt des CFF et d'InTrainCom pour cette approche innovante. Ces derniers s'intéressaient de près aux résultats obtenus par les vitrages isolants thermiques gravés au laser (vitrages HF) par rapport aux répéteurs dans le domaine de la réception mobile dans les trains. Ils attendaient également les résultats de la comparaison directe des coûts du cycle de vie et de la consommation d'énergie et, donc, du potentiel d'économie. L'examen approfondi des vitrages HF s'est appuyé, en premier lieu, non sur l'éventuelle économie d'énergie, malgré son effet secondaire positif, mais sur la possibilité de proposer à l'avenir une solution équivalente, voire supérieure tout en réduisant les coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance. La recherche d'une solution durable utilisant une technologie passive a été l'élément décisif.

2. Objectif du travail

La série de tests et de contrôles réalisée sur les vitrages HF doit permettre de déterminer si ces vitrages aptes à remplacer les répéteurs actuels. Cette procédure repose sur quatre piliers.

1. Mesure de la performance de la communication vocale et de la transmission de données par rapport aux systèmes de répéteurs dans différents types de véhicules. Qu'est-ce qui arrive jusqu'au client? La priorité est accordée ici à l'expérience client en matière de connectivité (communication vocale et transmission de données) dans le train avec répéteurs SISO ou MIMO, sans répéteurs et avec vitrages HF.
2. Effets des vitrages isolants thermiques gravés au laser sur la climatisation des véhicules et la consommation d'énergie, sur la base des valeurs g et U_g mesurées avec les nouveaux produits.
3. Création de bases décisionnelles pour les projets de véhicules grâce à la comparaison des coûts du cycle de vie des répéteurs et des vitrages HF.
4. Évaluation de la qualité du séjour au moyen d'enquêtes clientèle permettant d'estimer l'utilité des vitrages HF dans les trains en marche.

Ces analyses doivent donner lieu à une recommandation favorable ou défavorable de l'utilisation des vitrages HF comme substitut aux répéteurs dans les véhicules ferroviaires. En cas de résultat favorable, une spécification pour de futurs projets d'acquisition devra être établie à l'attention des fabricants.

3. Stratégie de recherche et connaissances actuelles

Il s'agissait jusqu'ici de garantir au client une couverture mobile optimale dans le train par l'installation ou le remplacement de composants actifs et passifs (antennes de toit, répéteurs, commutateurs, câbles rayonnants, etc.). L'ingénierie HF nécessaire aux processus d'acquisition et de modernisation a été définie pour chaque type de véhicule, puis mise en œuvre avec InTrainCom (Salt, Sunrise et Swisscom).

L'émergence de premières pistes de solution et les tests en laboratoire réalisés sur des vitrages HF par Siemens Wien en 2015 et l'EPFL/Swisscom en 2016 ont incité les CFF et le consortium à étudier cette thématique.

Outre l'aspect de la perméabilité, la performance des vitrages modifiés par rapport à la technologie actuelle (répéteurs SISO) et à la future technologie étendue (MIMO 2x2) a aussi joué un rôle important. Les CFF se sont en outre intéressés à l'effet des vitrages HF sur la climatisation (valeurs g et U_g) et au potentiel d'économies financières sous l'angle des coûts du cycle de vie. La comparaison de variantes de vitres et de répéteurs en amont du projet de modernisation IC 2020 doit faciliter la prise de décision ultérieure.

Le dernier point des analyses portait sur l'acceptation par la clientèle des vitrages laissant passer les ondes radio et, notamment, sur la réaction au nouveau modèle de vitrage tramé. La performance (réception mobile, largeur de bande, etc.) n'a pas été prise en compte dans l'enquête.

4. Résultats

4.1. PROPRIÉTÉS DES VITRAGES HF

La réalisation de plusieurs courses de mesure sur différents tronçons et avec différents types de véhicules devait permettre de comparer la performance des systèmes de répéteurs actuels et celle des vitrages HF. Toutes les courses ont été accompagnées par les trois opérateurs mobiles suisses (Salt, Sunrise et Swisscom) et réalisées par leurs soins (hormis les mesures des 20 et 21 juin 2017). Les systèmes de mesures utilisés par les opérateurs se composaient de terminaux de clients équipés du logiciel de mesure correspondant.

4.1.1. Campagne de mesures IC 2000 des 20 et 21 juin 2017 et diverses mesures complémentaires

Les mesures comparatives les plus complexes se sont déroulées les 20 et 21 juin 2017. Un véhicule doté de répéteurs SISO et deux prototypes (avec MIMO 2x2 et vitrages HF) ont été utilisés à cette occasion.

Type de véhicule	Équipement	Numéro UIC	Tronçon de mesure
IC 2000 A	Répéteur SISO	50 85 1694 061 - 4	Brigue–Berne–Bâle–Berne
IC 2000 A	Répéteur MIMO	50 85 1694 038 - 6	Brigue–Berne–Bâle–Berne
IC 2000 A	Prototype de vitrages HF (0,2 mm)	50 85 1694 002 - 2	Brigue–Berne–Bâle–Berne

Deux courses de mesures ont été effectuées sur deux jours différents dans les conditions suivantes:

Course de mesures du 20 juin 2017 (jour 1):

comparaison répéteur MIMO (véhicule 2)/vitrages HF (véhicule 3),
tronçon: Bern–(LBT)–Brig–Bern–(NBS)–Basel SBB–(NBS)–Bern

Course de mesures du 21 juin 2017 (jour 2):

comparaison répéteur SISO (véhicule 1)/vitrage HF (véhicule 3),
tronçon: Bern–(LBT)–Brig–Bern–(NBS)–Basel SBB–(NBS)–Bern

Le train de mesure se composait d'une locomotive Re 460, de trois voitures A IC 2000 (véhicules 1-3) et d'une voiture de commande IC Bt.

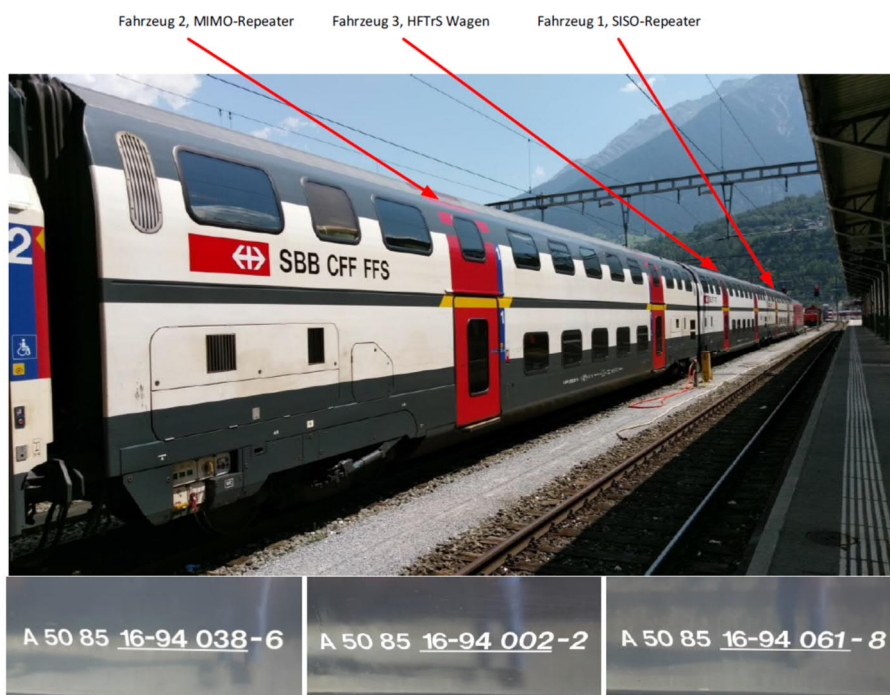


Illustration 3: train de mesure à Brigue. Source: STRAPAG.

Les tronçons de ligne sélectionnés pour les courses de mesures correspondent aux secteurs de circulation actuels et futurs de l'IC 2000. Deux montages de mesure étaient planifiés. Pour la course de mesures du premier jour, il était prévu d'utiliser deux équipements identiques incluant cinq smartphones et un scanner. Pour la course de la seconde journée, cinq smartphones étaient prévus pour le premier montage et cinq smartphones et deux scanners (1 antenne intérieure et 1 antenne extérieure) pour le deuxième montage.

Le scanner 1 (véhicule 3) n'a fonctionné que le premier jour sur le tronçon Berne–Brigue. La prise USB s'est ensuite avérée inutilisable. Un seul scanner a donc été utilisé jusqu'à la fin de la campagne. Celui-ci a été laissé dans le véhicule 2 (répéteur MIMO) au cours de la première journée de mesure. Le lendemain, les mesures ont été effectuées en alternance avec des antennes intérieures et extérieures dans le véhicule 3 pour permettre une comparaison des trajets aller et retour.

Pour garantir une précision maximale des géodonnées dans les zones sans réception GPS (tunnels) en cours d'enregistrement, deux récepteurs GPS équipés d'un gyrocompas calibré et intégré ont été utilisés. Associée au capteur de déplacement connecté, cette solution a permis un enregistrement hautement précis.

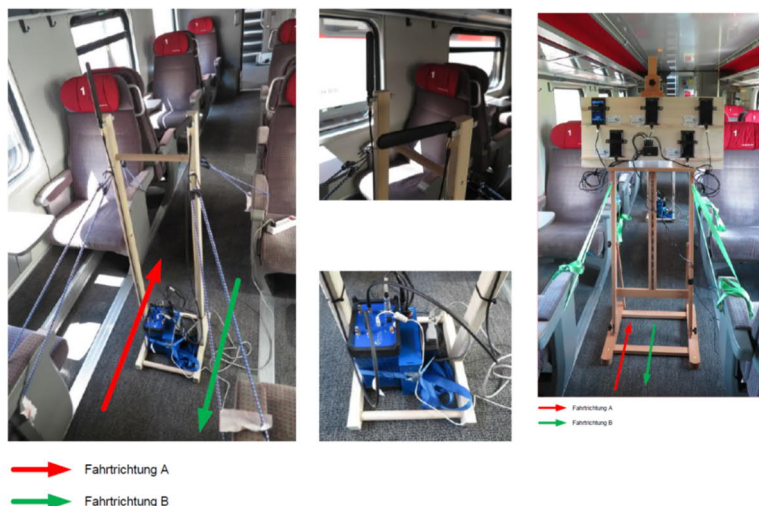


Illustration 4: montage de mesure dans le train. Source: STRAPAG.

Les mesures des 21 et 22 juin 2017 ont été suivies par quelques mesures complémentaires visant à contrôler les points en suspens pendant l'exploitation régulière entre Bern et Zürich HB. Les véhicules (1-3) ont circulé encore quelque temps entre Bern et Zürich (roulement 716).

Résultats des mesures comparatives Répéteurs SISO-MIMO/vitrages HF

- L'expérience client en matière de réception mobile est comparable dans les voitures équipées de vitrages HF et celles équipées d'un répéteur MIMO 2x2.
- Le débit de données sur la liaison montante et la liaison descendante avec vitrages HF est similaire, voire supérieur à celui du répéteur MIMO 2x2.
- Le répéteur SISO (état d'équipement actuel) affiche des résultats nettement inférieurs aux vitrages HF et au MIMO 2x2.
- L'utilisation du système MIMO dans la voiture avec vitrages HF est supérieure à celle de la voiture équipée du répéteur MIMO.
- La qualité du signal est comparable pour les trois systèmes testés (SISO, MIMO, vitrages HF).
- Le niveau de réception avec les vitrages HF est inférieur à celui des deux autres variantes. Mais cela n'a aucune incidence sur l'expérience client.
- Aucune hausse du nombre d'interruptions de conservation n'est enregistrée avec les vitrages HF (CS et VoLTE).

Au vu des résultats des mesures comparatives, l'introduction de vitrages HF a été recommandée dans le cadre du projet de modernisation des voitures IC 2000. Le contrôle suivant a porté sur les flottes Domino et ICN.

4.1.2. Courses de mesures IC 2000 par le Groupe P3 (3 et 6 novembre 2017)

Pour faire valider les résultats des mesures par un organe tiers indépendant, le Groupe P3 a été chargé de réaliser une mesure comparative. Celle-ci a été réalisée au moyen de terminaux de clients pendant le service régulier entre Zurich et Berne. Une composition identique de véhicules a été utilisée afin de

permettre une comparaison directe. Les mesures ont été effectuées à l'étage inférieur comme à l'étage supérieur.

Type de véhicule	Équipement	Numéro UIC	Tronçon de mesure
IC 2000 A	Répéteur SISO	50 85 1694 061 - 4	Bern–Zürich HB
IC 2000 A	Répéteur MIMO	50 85 1694 038 - 6	Bern–Zürich HB
IC 2000 A	Prototype de vitrages (0,2 mm)	50 85 1694 002 - 2	Bern–Zürich HB

Les mesures réalisées ont confirmé dans une large mesure les conclusions d'InTrainCom formulées les 20 et 21 juin 2017.

- Les valeurs de réception sont certes supérieures dans les deux voitures équipées de répéteurs, mais les vitrages HF l'emportent incontestablement dans le domaine du téléchargement de données.
- Malgré les valeurs de réception supérieures, la performance des données n'est pas meilleure pour tous les services dans les voitures équipées de répéteurs.
- L'étage (inférieur ou supérieur) ne semble pas jouer un rôle déterminant pour la performance.
- On observe des différences entre les services de téléchargement et de télétransmission. Les vitrages HF présentent un avantage indéniable pour le téléchargement, la navigation sur Internet et les services de streaming tandis que les répéteurs garantissent une meilleure télétransmission. Les résultats des répéteurs utilisant la technologie MIMO sont meilleurs que ceux des répéteurs SISO.
- Dans le domaine des services vocaux, aucune différence notable n'est relevée entre les vitrages HF et les répéteurs.

4.1.3. Courses de mesures Domino (15 décembre 2017)

Plusieurs courses de mesures ont été effectuées sur le tronçon Lausanne–Neuchâtel. Comme, à cette date, seuls quelque 20% des Domino disposaient de répéteurs SISO, les mesures comparatives ont été réalisées entre les vitrages HF et les vitrages standard. Le train utilisé pour le test (94 85 7 560 217-2) se composait d'une voiture de commande (ABt)/d'une voiture intermédiaire (INOVA), toutes deux équipées de vitrages standard, et d'une automotrice (RBDe) avec vitrages HF.

Type de véhicule	Équipement	Numéro UIC	Tronçon de mesure
RBDe	Prototype de vitrages (0,02 mm)	94 85 7 560 217-2	Lausanne–Neuchâtel
INOVA	Vitres standard		Lausanne–Neuchâtel
ABt	Vitres standard		Lausanne–Neuchâtel

Les mesures ont été réalisées avec des appareils finaux de clients afin de contrôler la qualité de la réception mobile. Les trois opérateurs mobiles ont obtenu les résultats ci-après.

- Les vitrages HF garantissent des niveaux de signal plus élevés.
- Les vitrages HF améliorent le rapport signal à bruit.
- Les vitrages HF améliorent la qualité de bout en bout.
- Les vitrages HF permettent des débits de données supérieurs, notamment sur la liaison montante.
- Dans l'ensemble, les vitrages HF garantissent une réception mobile nettement supérieure.

Au regard de ces conclusions, il a été décidé d'équiper la flotte Domino de vitrages HF en remplacement des répéteurs (SISO). Les véhicules Domino déjà équipés de répéteurs ne seront pas modifiés.

4.1.4. Courses de mesures ICN (25 août 2018)

En vue de la modernisation de la flotte ICN, une voiture (Bt) d'une composition ICN (500 027) a été équipée de vitrages HF (0,05 mm). Le système de répéteurs en place a été désactivé ou déconnecté. Les mesures ont été réalisées sur le tronçon Lausanne–Neuchâtel, dans chaque voiture en alternance. Ici aussi, les trois opérateurs ont participé aux opérations avec plusieurs terminaux de clients.

Type de véhicule	Équipement	Numéro UIC	Tronçon de mesure
ICN	Prototype de vitrages (0,05 mm)	500 027	Lausanne–Neuchâtel

Les résultats de l'évaluation (six trajets) sont les suivants.

- Les vitrages HF représentent une alternative intéressante aux répéteurs.
- En fonction de la fréquence, l'intensité de champ mesurée est inférieure de 10 à 12 dB à celle d'un système de répéteurs parfaitement opérationnel. Cette divergence n'affecte toutefois en rien l'expérience client, car les zones longeant les lignes ferroviaires sont bien couvertes par les opérateurs mobiles.
- La qualité de réception est identique ou supérieure à celle des répéteurs.
- Le débit de données en mode téléchargement ou télétransmission est identique ou meilleur.
- Le nombre d'interruptions de conversation est identique.

Conclusion: il est recommandé d'installer des vitrages HF comme substitut aux répéteurs SISO sur les ICN.

4.1.5. Mesures des vitres en série finales sur l'IC 2020 – véhicule pilote (8 mai 2019)

L'objectif de ces mesures était de contrôler la dernière série de vitrages HF et de valider formellement la transformation des voitures IC 2000. L'expérience mobile a été mesurée sur le tronçon Olten–Zürich–Romanshorn–Zürich, puis évaluée grâce à divers terminaux. Chaque opérateur mobile a réalisé et évalué ses propres mesures.

Type de véhicule	Équipement	Numéro UIC	Tronçon de mesure
IC 2020 A	Vitrages HF en qualité de série (0,05 mm)	50 85 16-94 021-2	Zürich HB–Romanshorn

Déclaration finale d'InTrainCom

- Il existe une légère différence entre l'étage inférieur et l'étage supérieur. Le débit de données est un peu plus élevé à l'étage supérieur.
- La réception est satisfaisante sur tout le tronçon. L'intensité de champ reste suffisante même en cas de signal extérieur affaibli.
- Les vitrages utilisés (0,05 mm) affichent une performance comparable à celle d'un répéteur dans toutes les bandes de fréquence actuelles (800/900/1800/2100/2600 MHz).
- La compatibilité 5G dans les bandes de fréquence actuelles est assurée par les mesures 4G et la similitude entre les signaux 4G et 5G.

Considérant l'aspect technique des vitrages HF et les résultats de la connectivité, InTrainCom valide le déploiement du produit sélectionné (vitrage HF de 0,05 mm gravé au laser).

Conclusion générale

Les mesures réalisées dans les véhicules du type Domino et ICN confirment les résultats des mesures comparatives à bord de l'IC 2000 (répéteurs SISO, répéteurs MIMO et vitrages laissant passer les ondes). Pour simplifier, la performance des vitrages HF est similaire, voire supérieure à celle des répéteurs. Eu égard à la base de données étendue, les CFF et InTrainCom miseront en premier lieu sur la technologie passive des vitrages HF pour les futurs programmes d'acquisition et de modernisation.

Les résultats obtenus dans les véhicules à un étage (Domino et ICN) ayant été confirmés, aucune mesure supplémentaire ne sera prise dans un premier temps. Concernant les types de véhicules prévus pour une prochaine modification (VU IV, EC et IC Bt), aucun véhicule pilote ne sera donc construit, en amont de l'appel d'offres, pour la réalisation de mesures comparatives entre vitrages HF et répéteurs. Une mise au concours directe sera organisée pour les vitrages HF sur la base d'une spécification détaillée.

4.2. CLIMATISATION ET CONSOMMATION D'ÉNERGIE

4.2.1. Structure du verre aux CFF

La structure du verre pour les vitrages extérieurs est spécifiée dans deux règles techniques CFF: la BCA 20003476 sur les fenêtres extérieures de voitures et rames automotrices et la BCA 20152066 sur les essais thermiques et photométriques de packs de vitrage. Dans le cadre des travaux, une réglementation complémentaire a été établie avec InTrainCom pour la définition des propriétés HF des vitrages. Elle sera jointe aux futurs appels d'offres. Les CFF ont également convenu de conserver la structure existante du verre en cas d'équipement ultérieur pour ne pas prendre de risque supplémentaire.

Les vitrages isolants des fenêtres extérieures se composent de verre feuilleté de sécurité pour la face extérieure et de verre de sécurité trempé pour la face intérieure. Pour les vitrages fixes, le verre simple de la solution extérieure peut se composer de verre flotté. Pour les fenêtres de secours, le verre feuilleté de sécurité se compose obligatoirement de verre de sécurité trempé. L'épaisseur de verre globale varie de 11 à 15 mm selon le type de vitrage. Le verre feuilleté de sécurité est recouvert, sur sa face intérieure, d'un film antisolaire (métallisé) qui reflète les rayons infrarouges extérieurs. La structure d'une fenêtre et le procédé de métallisation dépendent du fabricant et du savoir-faire des fournisseurs.

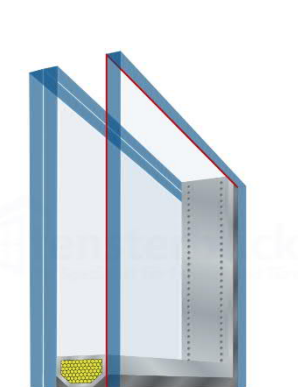


Illustration 6: coupe transversale d'une fenêtre avec verre feuilleté de sécurité et verre trempé. Source: fensterblick.de.

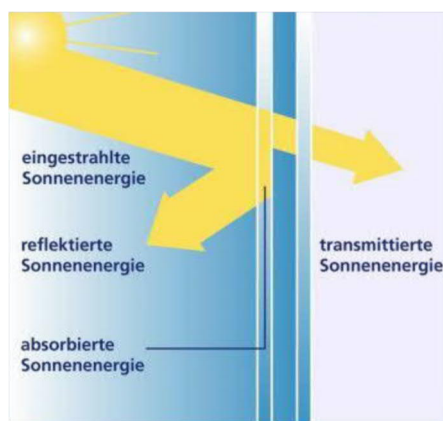


Illustration 7: fonctionnement d'un vitrage antisolaire double. Source: fensterfinder.de/graphisme: Interpane.

Toutes les bordures du verre sont ourlées et protégées par un dispositif supplémentaire en fonction du type de vitrage.

L'examen de la consommation d'énergie a porté non seulement sur la structure des vitres, mais aussi sur la modification au laser du revêtement antisolaire par les fabricants. Concrètement, ce film a été perforé, c'est-à-dire interrompu, le long de lignes. Chaque fabricant utilise une sélection propre de motifs (carrés, alvéoles, etc.) et d'épaisseurs de ligne (de 0,2 à 0,02 mm).

Illustration 8: fenêtre avec film antisolaire alvéolé. Source: RRX.de.



Illustration 9: fenêtre avec motifs à angle droit. Source: CFF.

4.2.2. Comparaison des valeurs thermophysiques

Les principaux critères utilisés pour le contrôle des valeurs thermophysiques sont le coefficient global de transmission d'énergie (valeur g), le coefficient de transmission thermique (valeur Ug) et la transmission lumineuse (TL). Le coefficient global de transmission d'énergie g admet des valeurs situées entre 0 et 1. Ainsi, une valeur g de 0,4 indique une transmission de 40% de la densité du flux thermique

solaire. Plus la valeur g est basse, plus la part du rayonnement solaire traitée par le système de climatisation pendant le processus de refroidissement est faible, ce qui agit également sur la charge d'énergie consommée. Plus la valeur Ug (coefficient de transmission thermique) est basse, plus la perte de chaleur induite par le vitrage et, partant, la part d'énergie compensée par le chauffage à bord du véhicule sont faibles. La perforation ne joue aucun rôle dans l'évaluation de la valeur Ug. En revanche, le produit utilisé entre le vitrage intérieur et extérieur ainsi que son comportement au fluage revêtent une importance majeure. Outre les solutions sous vide, l'espace intermédiaire des vitres est généralement rempli au gaz rare comme l'argon ou le krypton.

Transmission lumineuse: le degré de transmission lumineuse d'un vitrage désigne la part du rayonnement solaire transmise dans le domaine de la lumière visible. En fonction de leur efficacité énergétique, les vitrages antisolaires présentent une transmittance de la lumière située entre 40% et 70%. Plus le pourcentage est élevé, plus la fenêtre laisse entrer la lumière et plus le compartiment est «clair» en journée. Au moment de l'acquisition/l'appel d'offres, les valeurs de la transmission lumineuse indiquées par le fabricant de verre, la valeur g et la valeur Ug doivent être démontrées par des mesures, puis documentées. Plusieurs normes sont disponibles à cet effet.

Dans l'idéal, les vitrages HF afficheront donc eux aussi des valeurs g et Ug faibles. Le tableau ci-dessous résulte de la comparaison entre les vitrages de la dotation initiale et les nouveaux vitrages perforés au laser de l'IC 2020.

Verglasungs-Variante		Erstausrüstung «Normalverglasung» IC2000	HF-Scheiben mit 0.05mm Laserung	
			Oberdeck	Unterdeck
U-Wert	[W/m ² K]	1.8	1.4	1.4
g-wert	[%]	39	41	41
Lichttransmission	[%]	51	61	61
Fensterflächen				
Oberdeck Sonnenseite	[m ²]	12.6	12.6	
Unterdeck Sonnenseite	[m ²]	4.8		4.8
Türen Sonnenseite	[m ²]	0.8		0.8
Oberdeck abgewandt	[m ²]	12.6	12.6	
Unterdeck abgewandt	[m ²]	4.8		4.8
Türen abgewandt	[m ²]	0.8		0.8
Spezifische Wärmestromdichte Sonne direkt	[W/m ²]	606	606	606
Spezifische Wärmestromdichte Sonne diffus	[W/m ²]	30	30	30
Raumlufttemperatur	[°C]	26	26	26
Aussenlufttemperatur	[°C]	32	32	32
Äusserer Wärmeübergangskoeffizient	[W/m ² K]	13	13	13
Innerer Wärmeübergangskoeffizient	[W/m ² K]	9	9	9
Transmission	[kW]	1381	759	339
Sonneneinstrahlung	[kW]	5417	3899	1740
Teilsomme			4658	2079
Summe Transmission + Strahlung	[kW]	6798	6737	

Illustration 10: comparaison entre le vitrage de la dotation initiale et le nouveau produit (vitrage HF).Source: CFF.

La comparaison du vitrage livré (dotation initiale) et de la mesure des vitrages prévus dans l'IC 2020 pour un point d'exploitation estival indique un apport thermique légèrement inférieur pour le nouveau vitrage. La valeur g est en légère hausse pour le vitrage perforé au laser, mais la valeur U de cette solution est inférieure à celle de la livraison initiale. Le vieillissement du vitrage perforé au laser et rempli à l'argon (échappement, comportement au fluage) ne peut pas être évalué. Il est considéré comme un risque pendant le cycle de vie. Des garanties supplémentaires seront demandées aux fournisseurs dans le cadre de la procédure d'appel d'offres pour compenser les risques résiduels à long terme.

4.3. ACCEPTATION DES VITRAGES TRAITÉS AU LASER

L'acceptation du nouveau produit par la clientèle est essentielle, car les voyageurs sont les premiers concernés par cette transformation. La mise en service du premier prototype de l'IC 2000 équipé de vitrages HF s'est accompagnée d'une enquête réalisée à bord du train en marche.

Cette dernière a été réalisée en août 2017 par un institut d'étude du marché neutre et indépendant au cours de l'exploitation commerciale (deux entretiens de groupe). Le prototype de voiture (IC 2000, 1^{re} classe, étage inférieur) disposait d'un modèle de vitrage dont la gravure était relativement bien visible (0,2 mm). Les CFF se sont intéressés notamment aux aspects ci-après.

- Le client perçoit-il une différence au niveau des vitrages pendant son trajet? Que remarque-t-il concrètement? À quel moment cette modification le gêne-t-elle? Comment le client qualifie-t-il cette gêne?
- Comment le client qualifie-t-il cette gêne s'il sait que la liaison mobile est améliorée?

Dans les deux situations d'entretien, l'institut de recherche a introduit le thème en trois phases. La première phase générale portait sur le thème de la qualité du séjour et la question posée était la suivante: «Selon le client, quels sont les éléments contribuant à l'agrément d'un voyage?». Dans un deuxième temps, les voyageurs ont été interrogés sur les vitrages traités au laser sans toutefois recevoir d'informations sur leur utilité concrète. Pendant la troisième phase, les clients ont été informés de l'utilité concrète des nouveaux vitrages.

Une fois informés du remplacement des vitrages, les testeurs ont effectivement pris conscience des motifs dans les vitres. Les changements apportés à la structure des vitres ont eux aussi été abordés. Sans connaissance de l'utilité des vitrages, l'évaluation formulée par les voyageurs s'est avérée majoritairement neutre à favorable puisque les modifications étaient à peine perçues.

Elle est restée dans le même cadre après la communication de l'information sur l'utilité. En revanche, certains points ouverts concernant notamment l'impact sur l'environnement, les coûts ou la santé ont suscité quelques doutes. L'institut y voit une forme de rationalisation découlant du contexte de test. Au cours de l'exploitation normale, les nouveaux vitrages seront à peine remarqués ou remis en question.

Malgré l'évaluation neutre, voire positive de l'essai CFF, et contrairement aux attentes, l'entreprise privilégie une gravure extra-fine et quasiment invisible pour les futures mises au concours.

Les exigences ci-après ont été définies pour les futurs marchés publics portant sur des vitrages gravés au laser.

- La forme géométrique et la taille de toutes les surfaces non traitées (entre les lignes gravées) doivent être identiques.
- La largeur des lignes de la surface traitée (lignes gravées) ne peut dépasser 0,05 mm. La tolérance de rectitude s'élève au plus à 20% de la largeur de la surface traitée.
- La surface traitée s'étend sans interruption jusqu'à la bordure de la vitre. Le décalage des surfaces traitées et des lignes (p. ex. après un déplacement de la vitre à graver) n'est pas admis.
- La distance minimale entre des surfaces gravées parallèles (lignes gravées) doit s'élever à 1 mm au minimum.
- La largeur minimale de chaque surface non traitée ne peut être supérieure à 2,5 mm².

La principale difficulté qui s'annonce dans le cadre des futurs appels d'offres résidera dans la pondération et l'évaluation de ces exigences. La perception de la gravure par le client doit être placée au même plan que l'aspect des coûts, des propriétés HF ou de la climatisation/consommation d'énergie et ne peut, finalement, entraver la qualité du séjour à bord des trains.

4.4. COÛTS DU CYCLE DE VIE

La comparaison des coûts du cycle de vie de plusieurs variantes d'équipement (vitrages HF ou répéteurs) doit faciliter la décision relative à l'acquisition des nouveaux produits HF.

Les coûts intégrés à l'analyse LCC sont les suivants: investissement et renouvellement, y c. renchérissement, frais de maintenance, y c. renchérissement, et consommation d'énergie (apport et pertes thermiques liées aux vitrages contre consommation d'énergie des répéteurs).

Une analyse correspondante est proposée ci-après sur la base du projet de modernisation IC 2020. Dans le cadre de ce projet, il s'agissait de choisir entre une mise à niveau des répéteurs actuels (SISO) vers une nouvelle version plus performante (MIMO 2x2) et l'utilisation de vitrages HF avec démantèlement du système de répéteurs.

Les voitures du parc IC 2000 utilisent encore majoritairement les vitres de la dotation initiale. Seules les fenêtres de secours ont été remplacées entre 2013 et 2018. Leur état est donc satisfaisant.

4.4.1. Mandat à Gestion du cycle de vie des CFF

- Élaboration d'une base décisionnelle pour l'IC 2020 en comparant les différentes solutions de remplacement des fenêtres sous l'angle des coûts du cycle de vie sur 27 ans (durée de vie résiduelle des véhicules d'ici à 2043).
- Prise en compte des principaux facteurs de coûts:
 - investissements et renouvellements, y c. renchérissement
 - investissements nécessaires au remplacement des fenêtres
 - installation des fenêtres par les CFF
 - frais de maintenance, y c. renchérissement
 - consommation de courant (apport ou pertes d'énergie liés aux vitrages HF contre consommation d'énergie des répéteurs)
- Conditions-cadres:
 - taux de renchérissement (selon les CFF):

2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023 et suiv.
0,2%	0,6%	0,8%	1,0%	1,0%	1,0%	1,5%
 - taux de rendement minimal 1,78%

4.4.2. Variantes considérées pour la modernisation de l'IC 2020

Cinq propositions de solution ont été analysées et évaluées pour la comparaison des coûts du cycle de vie «Réception mobile à bord du train» dans le cadre du projet de modernisation de l'IC 2020:

Variante 1	Adaptation des répéteurs et remplacement des fenêtres avec remplissage à l'air, sans échange des fenêtres de secours
Valeurs	Valeur $U_g = 1,6$ (W/m²K), valeur $g = 0,35$
Hypothèses	- Toutes les fenêtres, hormis les fenêtres de secours, sont remplacées. - Effet du facteur g (coefficient global de transmission d'énergie) pris en compte: valeur $g = 0,35$ - Toutes les fenêtres de secours sont nouvelles et ne sont pas remplacées. - Mise à niveau des répéteurs (version MIMO 2x2) - Puissance des répéteurs 700 W - Remplacement de tous les vitrages pris en compte dans le cycle de vie résiduel - Remplacement de tous les répéteurs au bout de 10 ans (obsolescence)

Variante 2	Remplacement des fenêtres avec vitrages HF et remplissage au gaz rare; remplacement de toutes les fenêtres
Valeurs	Valeur $U_g = 1,4$ (W/m²K), valeur $g = 0,41$
Hypothèses	- Toutes les fenêtres sont remplacées. - Effet du facteur g (coefficient global de transmission d'énergie) pris en compte: valeur $g = 0,41$ - Démantèlement des répéteurs pendant la modernisation - Économie de coûts par la suppression des contrats de maintenance des répéteurs (actuellement prise en charge par InTrainCom) - Remplacement de toutes les fenêtres pris en compte dans le cycle de vie résiduel
Variante 3	Remplacement des fenêtres avec vitrages HF et remplissage au gaz rare, sans échange des fenêtres de secours
Valeurs	Valeur $U_g = 1,4$ (W/m²K), valeur $g = 0,41$
Hypothèses	- Toutes les fenêtres, hormis les fenêtres de secours, sont remplacées. - Effet du facteur g (coefficient global de transmission d'énergie) pris en compte: valeur $g = 0,41$ - Toutes les fenêtres de secours sont nouvelles et ne sont pas remplacées. - Démantèlement des répéteurs pendant la modernisation - Économie de coûts par la suppression des contrats de maintenance des répéteurs (actuellement prise en charge par InTrainCom) - Remplacement de tous les vitrages pris en compte dans le cycle de vie résiduel
Variante 4	Adaptation des répéteurs et remplacement des fenêtres avec remplissage au gaz rare»; remplacement de toutes les fenêtres
Valeurs	Valeur $U_g = 1,2$ (W/m²K), valeur $g = 0,35$
Hypothèses	- Toutes les fenêtres sont remplacées - Effet du facteur g (coefficient global de transmission d'énergie) pris en compte: valeur $g = 0,35$ - Mise à niveau des répéteurs (version MIMO 2x2) - Puissance des répéteurs 700 W - Remplacement de tous les vitrages pris en compte dans le cycle de vie résiduel - Remplacement de tous les répéteurs au bout de 10 ans (obsolescence)
Variante 5	Adaptation des répéteurs et remplacement des fenêtres avec remplissage au gaz rare, sans échange des fenêtres de secours
Valeurs	Valeur $U_g = 1,2$ (W/m²K), valeur $g = 0,35$
Hypothèses	- Toutes les fenêtres, hormis les fenêtres de secours, sont remplacées. - Effet du facteur g (coefficient global de transmission d'énergie) pris en compte: valeur $g = 0,35$ - Toutes les fenêtres de secours sont nouvelles et ne sont pas remplacées. - Mise à niveau des répéteurs (version MIMO 2x2) - Puissance des répéteurs 700 W - Remplacement de tous les vitrages pris en compte dans le cycle de vie résiduel - Remplacement de tous les répéteurs au bout de 10 ans (obsolescence)

Hypothèses pour toutes les variantes:

Maintenance:

Compte tenu de la durée de vie indiquée, un remplacement intégral des vitrages HF est escompté à partir de 2030. Les coûts sont ventilés sur 10 ans suivant une courbe exponentielle. Seuls les vitrages sont intégrés aux coûts du matériel.

4.4.3. Paramètres des vitrages – vue d'ensemble

Type de vitrage	Valeur Ug	Valeur g	Remplissage/gravure au laser		
			Air	Gaz rare	Gravé
Dotation initiale en vitres (avant la modernisation)	1,8	0,39	X		
Nouveau vitrage avec air en remplissage Variante 1	1,6	0,35	X		
Vitrage HF avec gaz rare en remplissage Variantes 2 et 3	1,4	0,41		X	X
Nouvelle vitre avec gaz rare en remplissage Variantes 4 et 5	1,2	0,35		X	

4.4.4. Coûts énergétiques

Les coûts énergétiques sont calculés sur la base des hypothèses ci-après.

Une consommation d'énergie de 700 W par répéteur a été prise en compte pour les variantes (1, 4 et 5) avec adaptation des répéteurs (MIMO 2x2).

Les différentes variantes permettent une légère économie au niveau des fenêtres puisque les types de fenêtres affichent un coefficient de transmission thermique d'une valeur Ug de 1,2 à 1,8 [W/m²K].

Le rayonnement solaire est réduit grâce aux dispositifs antisolaires afin de diminuer la puissance frigorifique maximale requise. L'effet de la valeur g (coefficient global de transmission d'énergie) a été pris en compte comme suit:

- Facteur g (remplissage à l'air, nouveau) = 0,35
- Facteur g (remplissage à l'air, actuel) = 0,39
- Facteur g (remplissage au gaz rare) = 0,35
- Facteur g (vitrages gravés au laser) = 0,41
- Facteur de capacité du système de réfrigération = 1,5 (facteur de capacité moyen charge partielle/pleine charge) Été/hiver
- Densité du flux de chaleur provenant du rayonnement solaire sur la paroi latérale

4.4.5. Résultats qualitatifs et quantitatifs de l'analyse LCC

Variante 1	Adaptation des répéteurs et remplacement des fenêtres avec remplissage à l'air, sans échange des fenêtres de secours	
	Pour (+)	Contre (-)
	Nouveau vitrage avec valeur Ug = 1,6	Frais de maintenance élevés pendant le cycle de vie
		Coûts d'investissement élevés dus à l'adaptation des répéteurs (MIMO 2x2)
		Frais supplémentaires élevés dus au remplacement des répéteurs au bout de 10 ans (obsolescence)
		LCC énergie = 324 GWh
Variante 2	Remplacement des fenêtres avec vitrages HF et remplissage au gaz rare, remplacement de toutes les fenêtres	
	Pour (+)	Contre (-)
	Nouvelles fenêtres gravées au laser avec valeur Ug = 1,6	Coûts d'investissement uniques (vitrages HF)
	Économie d'énergie et de poids grâce au renoncement aux répéteurs/à leur démontage	Charges liées au démantèlement des répéteurs
	Suppression des frais d'entretien des répéteurs	Hausse de la consommation énergétique due à la prestation de réfrigération en été (facteur g = 0,41)
	Hausse du confort pour les clients	LCC énergie = 334 GWh (+ 10 GWh par rapport à la variante 1)
	Économie totale des coûts LCC par rapport à la variante 1 = CHF 15,6 millions	Hausse des coûts LCC énergie de CHF 1,3 million par rapport à la variante 1
Variante 3	Remplacement des fenêtres avec vitrages HF et remplissage au gaz rare, sans échange des fenêtres de secours	
	Pour (+)	Contre (-)
	Nouvelles fenêtres gravées au laser avec valeur Ug = 1,6	Coûts d'investissement uniques (vitrages HF)
	Économie d'énergie et de poids grâce au renoncement aux répéteurs/à leur démontage	Charges liées au démantèlement des répéteurs
	Suppression des frais d'entretien des répéteurs	Hausse de la consommation énergétique due à la prestation de réfrigération en été (facteur g = 0,41)
	Économie totale des coûts LCC par rapport à la variante 1 = CHF 15,6 millions	LCC énergie = 334 GWh (+ 10 GWh par rapport à la variante 1)
		Hausse des coûts LCC énergie de CHF 1,3 million par rapport à la variante 1
Variante 4	Adaptation des répéteurs et remplacement des fenêtres avec remplissage au gaz rare», remplacement de toutes les fenêtres	
	Pour (+)	Contre (-)
	Nouvelles vitres avec valeur Ug = 1,2	Frais de maintenance élevés pendant le cycle de vie
	Hausse du confort des clients grâce au remplacement de tous les vitrages	Coûts d'investissement élevés dus à l'adaptation des répéteurs (MIMO 2x2)

		Frais supplémentaires élevés dus au remplacement des répéteurs au bout de 10 ans (obsolescence)
	Coûts totaux LCC = aucune économie de coûts par rapport à la variante 1	LCC énergie = 317 GWh (- 7 GWh par rapport à la variante 1)
		Économie LCC coûts énergétiques de CHF 0,9 million par rapport à la variante 1
Variante 5	Adaptation des répéteurs et remplacement des fenêtres avec remplissage au gaz rare, sans échange des fenêtres de secours	
	Pour (+)	Contre (-)
	Nouvelles vitres avec valeur Ug = 1,2	Frais de maintenance élevés pendant le cycle de vie
	Coûts totaux LCC = aucune économie de coûts par rapport à la variante 1	Coûts d'investissement élevés dus à l'adaptation des répéteurs (MIMO 2x2)
		Frais supplémentaires élevés dus au remplacement des répéteurs au bout de 10 ans (obsolescence)
		LCC énergie = 317 GWh (- 7 GWh par rapport à la variante 1)
		Économie LCC coûts énergétiques de CHF 0,9 million par rapport à la variante 1

4.4.6. Recommandation et motivation

D'un point de vue financier, la solution recommandée est la variante 3: remplacement des fenêtres avec vitrages HF et remplissage au gaz rare, sans échange des fenêtres de secours.

Malgré le besoin d'énergie accru de CHF 1,3 million (+10 GWh) sur le cycle de vie complet (2017-2043), cette variante présente des coûts d'investissement et de maintenance moins élevés d'environ CHF 15,6 millions en valeur cumulée.

Elle promet en outre des économies supérieures grâce au renoncement à l'adaptation des répéteurs (MIMO 2x2) et à la suppression du remplacement des répéteurs au bout de 10 ans. Très similaire dans ses chiffres financiers, la variante 2 peut également être prise en considération: remplacement des fenêtres avec vitrages HF et remplissage au gaz rare, remplacement de toutes les fenêtres.

En matière de consommation d'énergie, un facteur déterminant, la valeur g, s'est établi à 0,41 pour les variantes 2 et 3, soit un résultat légèrement supérieur à celui du vitrage datant de la première dotation (0,39). Les pertes d'énergie et, partant, la hausse des frais correspondants ont été intégrées aux analyses.

Au total, ces éléments n'exercent toutefois pas d'effet majeur. De même, l'image globale des LCC reste positive malgré la suppression du besoin en énergie des répéteurs (700 W par dispositif).

Le remplacement de toutes les fenêtres (variante 2) a été retenu pour le projet de modernisation de l'IC 2020. La mise en œuvre est en cours.

Conclusion générale:

La conclusion ci-dessous s'impose au terme des analyses LCC réalisées pour les divers types de flotte (IC 2020, Domino, ICN, etc.).

- Du point de vue des coûts du cycle de vie, les vitrages laissant passer les ondes l'emportent largement sur les répéteurs:
 - baisse notable des coûts d'investissement;
 - réduction des frais de maintenance.
 - consommation nette d'énergie différente en fonction du type de véhicule : consommation nette d'énergie légèrement supérieure pour les IC 2000 et inférieure pour les Domino (consommation des répéteurs contre légère hausse de la prestation réfrigérante en été).
- Compte tenu du manque d'expérience à long terme, il est encore difficile de dire avec précision comment vont vieillir les vitrages HF.

- Des garanties supplémentaires seront demandées aux fournisseurs dans le cadre de la procédure d'appel d'offres pour compenser les risques résiduels à long terme.

4.5. SITUATION ACTUELLE SUR LE MARCHÉ ET EXPLOITANTS FERROVIAIRES UTILISANT DES VITRAGES HF

Il y a deux ans environ, seuls quelques rares fabricants de verre expérimentaient le vitrage traité au laser. Aujourd'hui, la quasi-totalité des leaders du secteur propose des solutions de vitrage laissant passer les ondes, ce qui pourrait induire une baisse prochaine des coûts supplémentaires inhérents au traitement laser. Les surcoûts actuels par rapport aux vitrages classiques sont de l'ordre de 20% à 50% suivant le type de produit.

Les fournisseurs (de vitrages) proposant des produits HF en 2019 sont les suivants:

- AGC, Moutier, Suisse (nouveau: AGC, Bruxelles, Belgique)
- Flachglas Wernberg GmbH, Wernberg-Köblitz, Allemagne
- Schollglas Sachsen GmbH, Nossen, Allemagne
- SAINT-GOBAIN SULLY, Sully-sur-Loire, France
- Sessa Klein, Italie (solutions en cours d'élaboration)
- Siemens Suisse SA, Wallisellen, Suisse (brevet)

Exploitants ferroviaires utilisant des vitrages HF (liste non exhaustive):

Entreprise de transport (CH)	Fabricant/véhicule	Fournisseur de vitres
BLS SA	Bombardier «Nina»	AGC, Moutier
RBS	Stadler	Flachglas
SOB AG	Stadler «Traverso» et «Flirt»	Flachglas
AB	Stadler «Tango»	Flachglas
Entreprise de transport (A et D)	Fabricant/véhicule	Fournisseur de vitres
ÖBB	Bombardier «Talent»	Saint-Gobain
Rhein-Ruhr-Express (RRX)	Siemens «Desiro»	Schollglas

5. Conclusions et recommandations

Les mesures comparatives réalisées avec des vitrages HF et des répéteurs confirment la performance similaire, voire supérieure des produits HF. Dans le domaine LCC, ces derniers l'emportent largement sur les répéteurs. Le bilan général est positif malgré les pertes d'énergie quelque peu supérieures du nouveau vitrage ainsi que les surcoûts qu'il occasionne.

Les résultats obtenus ne permettent pas de tirer de conclusions générales sur les éventuelles économies d'énergie réalisées avec les vitrages HF et sur la contribution à la stratégie énergétique. Avec la baisse d'énergie liée à la suppression des répéteurs, les vitrages HF entraînent une consommation nette d'énergie inférieure (Domino) ou légèrement supérieure (IC 2020) en fonction du type de véhicule.

Les CFF et InTrainCom encourageront donc le remplacement des répéteurs par des vitrages HF lors des prochains projets d'acquisition ou de modernisation de véhicules. Des garanties supplémentaires seront demandées aux fournisseurs dans le cadre de la procédure d'appel d'offres pour compenser les risques résiduels à long terme (p. ex. vieillissement des vitrages).

Projets de véhicules en cours aux CFF:

Projets de véhicules avec vitrages HF en cours de mise en œuvre	IC 2020, Domino, automotrice articulée Seetal
Projets de véhicules avec vitrages HF en cours d'examen	ICN, IC Bt, VU IV, EC et DTZ

Les vitrages HF sont compatibles avec le 5G dans les bandes de fréquences actuelles (800-2600 MHz) et les nouvelles fréquences (700 MHz). L'introduction des nouvelles fréquences de 3,5 GHz nécessaires à l'augmentation de la largeur de bande nécessite des analyses complémentaires.

Les exigences fonctionnelles posées aux vitrages laissant passer les ondes seront harmonisées avec les opérateurs mobiles (Swisscom, Sunrise et Salt) en vue des futurs appels d'offres. Les spécifications actuelles des opérateurs mobiles sont annexées au présent document. Le cas échéant, les entreprises de transport intéressées peuvent contacter InTrainCom.

Liste des symboles et abréviations

La liste ci-dessous répertorie les symboles et abréviations (y c. les unités ou définitions correspondantes) utilisés dans ce rapport.

Vitrages HF	Vitrages haute fréquence , vitrages laissant passer les ondes
InTrainCom	Consortium (Salt, Sunrise et Swisscom) dont l'objectif est l'amélioration de la réception mobile à bord des trains.
LCC	Life Cycle Cost , coûts du cycle de vie.
SISO	Single Input, Single Output – désigne un système de communication sans fil dans lequel l'émetteur et le récepteur utilisent une antenne respective. SISO représente la technologie d'antenne la plus simple.
MIMO (2x2)	Multiple Input, Multiple Output – désigne, dans divers secteurs de la transmission sans fil utilisée par la technique de l'information, un procédé ou système de transmission permettant d'utiliser plusieurs antennes d'émission et de réception pour la communication sans fil.
CS	Circuit Switched – permet la téléphonie vocale via les réseaux GSM et UMTS.
VoLTE	Voice over LTE est une technologie mobile permettant la téléphonie vocale via le réseau 4G.

Annexes

Annexe 1: Comparaison HF/SISO/MIMO IC 2000

Annexe 2: Rapport de mesures IC 2000 de P3

Annexe 3: Mesures Domino

Annexe 4: Mesures ICN

Annexe 5: Mesures finales IC 2020

Annexe 6: Enquête auprès de la clientèle des CFF

Annexe 7: Analyse LCC pour l'IC 2000

Annexe 8: Analyse LCC pour le Domino

Annexe 9: Spécifications d'InTrainCom
