

HOXYGAS

RAPPORT DE VULGARISATION

JUIN 2012 – JANVIER 2017

Avec le support financier du programme européen LIFE+

Titre du livrable:	Rapport de vulgarisation
Action:	D3
Date du rapport:	31/01/2017
Préparé par:	AGC R&D
Niveau de sécurité:	Public
Nombre de pages:	10

Contact: Jiri Jangl (Jiri.jangl@agc.com)
Site web du projet: <http://www.agc-hoxygas.eu/>

Remerciements:

Ce rapport a été rédigé dans le cadre du cofinancement par le programme européen pour l'Environnement (LIFE+) durant la mise en place du projet *Validation of an innovative automotive glass process: hot oxygen combustion and hot natural gas "HOxyGas"* (LIFE11 ENV/CZ/000488). L'équipe du projet HOxyGas aimerait présenter ses remerciements à l'instrument financier Européen pour l'Environnement (LIFE+) pour son support financier.

Table des matières

RESUME.....3

1. INTRODUCTION4

DÉFI ENVIRONNEMENTAL.....4

LE PROJET HOXYGAS: OBJECTIF ET RESULTATS ATTENDUS5

PARTENAIRES DU PROJET6

2. LA TECHNOLOGIE DE FUSION INNOVANTE PROPOSEE PAR LE PROJET HOXYGAS.....7

IÈRE APPLICATION INDUSTRIELLE: LA COMBUSTION HYBRIDE (FIOUL + GN).....8

CHALLENGES ADDITIONNELS SPECIFIQUES LIES AU PROJET HOXYGAS.....8

3. PRINCIPALES ACTIVITES DU PROJET ET ACCOMPLISSEMENTS9

4. BENEFICES DU PROJET A LONG TERME ET PROCHAINES ETAPES.....10

BENEFICES ENVIRONNEMENTAUX10

BÉNÉFICES ÉCONOMIQUES10

PROCHAINES ETAPES: REPLICABILITE ET TRANSFERABILITE.....10

Résumé

Le projet HOxyGas, cofinancé par le programme Européen LIFE+, a été initié en Juin 2012 par AGC Flat Glass Czech a.s. (CZ) et AGC Glass Europe SA (BE). L'objectif du projet HOxyGas était la production de verre automobile plat coloré au sein d'un four équipé d'une technologie de combustion innovante, utilisant de l'oxygène (O₂) à haute température (jusqu'à 550°C) et du gaz naturel (GN) à haute température (jusqu'à 450°C) comme combustibles. Le projet couvrait l'ingénierie, la construction, la démonstration et la validation de cette technologie. L'objectif était de démontrer la maturité ainsi que le potentiel de la technologie d'oxy-combustion.

Il est important de noter que les systèmes actuels d'AGC utilisant l'oxy-combustion ne fonctionnent pas à 100% avec du Gaz Naturel. Comparativement à une technologie utilisant à 100% l'air-combustion (technologie de référence), la technologie innovante proposée espérait atteindre une augmentation de l'efficacité énergétique du four de 19,7% ainsi que les réductions d'émissions suivantes : émissions de CO₂ réduites de 5,5% (CO₂ émis par la production d'O₂), émissions de NO_x réduites de 79,2%, émissions de SO_x réduites de 35,5%, et émissions de poussières réduites de 67,7% en considérant un volume de 600 tonnes/jour.

Dans le premier chapitre de ce rapport, nous décrivons les défis relevés par le projet HOxyGas, ainsi que ses objectifs principaux et ses parties prenantes. Dans un second chapitre, seront détaillés la technologie innovante proposée et ses avantages. Dans un troisième chapitre, nous résumons les résultats et accomplissements du projet.

Enfin, au sein du dernier chapitre, nous nous arrêterons sur les bénéfices à long terme du projet, ainsi que la répliquabilité et la transférabilité des résultats obtenus.

Comme développé dans les prochaines sections, il était au départ prévu que la technologie soit utilisée pour produire du verre transparent à hauteur de 600 tonnes/jour ; cependant, le choix du verre vert clair a été préféré, pour un volume de 500 tonnes/jour compte-tenu des besoins du marché automobile. Ainsi, les impacts environnementaux constatés au cours de ce projet sont les suivants (en ligne avec les estimations, considérant un volume de 500 tonnes/jour) :

- CO₂ : émissions réduites de 5,5 +/- 3% soit 4800 tonnes de CO₂ économisées par an ;
- NO_x : émissions réduites de 85% ;
- SO_x : émissions réduites de 82% ;
- Consommation d'énergie réduite de 18,7 +/- 3%.

1. Introduction

Défi environnemental

La récente augmentation de la concentration de Gaz à Effet de Serre (GES) dans l'atmosphère est principalement due à l'activité humaine, et se trouve être très probablement la cause du phénomène de réchauffement climatique observé ces dernières années à échelle mondiale. Cet effet de serre « anthropogénique » est principalement causé par les émissions de CO₂ : plus de 50% des émissions de GES anthropogéniques sont des gaz carbonés, contribuant pour 75% à cet effet de serre. Ce chiffre avoisine les 90% si l'on ne considère que les émissions industrielles ; les industries ont donc un fort intérêt à faire de la réduction des émissions de CO₂ une priorité. Les processus industriels représentent l'un des secteurs les plus responsables des émissions de CO₂, avec 7% des émissions européennes.

En effet, après avoir connu une baisse en 2009, les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) sont remontées en 2010, supposément à cause de la crise financière mondiale, à un niveau record de 30,6 GTonnes, soit une augmentation de 5% par rapport au record précédent de 2008, quand les niveaux se sont hissés à 29.3 GTonnes. D'après les dernières estimations de l'AIE (Agence Internationale pour l'Energie), les émissions de CO₂ dans le secteur de l'énergie, industrie et transports ont été au plus haut de leur histoire en 2010.

De plus, les processus manufacturiers de produits minéraux, comme le verre, la chaux ou le ciment sont responsables de 50% de ces émissions. Par exemple, combinés, ils représentent plus de CO₂ que les industries de manufactures chimiques ou métalliques réunies.

Le verre est un élément clé pour de nombreuses industries. En 2006, le marché mondial du verre était estimé à environ 42 millions de tonnes, soit l'équivalent de 4.2 milliards de mètres carré de verre épais de 4 millimètres. Au niveau mondial, la consommation moyenne annuelle de verre est de 6kg par personne, et monte jusqu'à 18kg par personne en Europe de l'Ouest. La hausse de la demande de verre plat est généralement plus rapide que la hausse du PNB réel depuis les vingt dernières années.

En particulier, la production de verre plat automobile requiert une grande quantité d'énergie et produit un large volume de GES.

Malgré cela de nombreux efforts durant les dernières décennies ont été fait dans le but de réduire les besoins énergétiques : une réduction de 10% de la consommation d'énergie par tonne de verre depuis les années 1880s a été observée. Le niveau actuel se situe entre 6 et 7 GJ par tonne de verre, tandis que le minimum d'énergie requise théorique serait de 2 à 3 GJ par tonne de verre (l'énergie nécessaire pour la fusion des matériaux entrant dans sa composition).

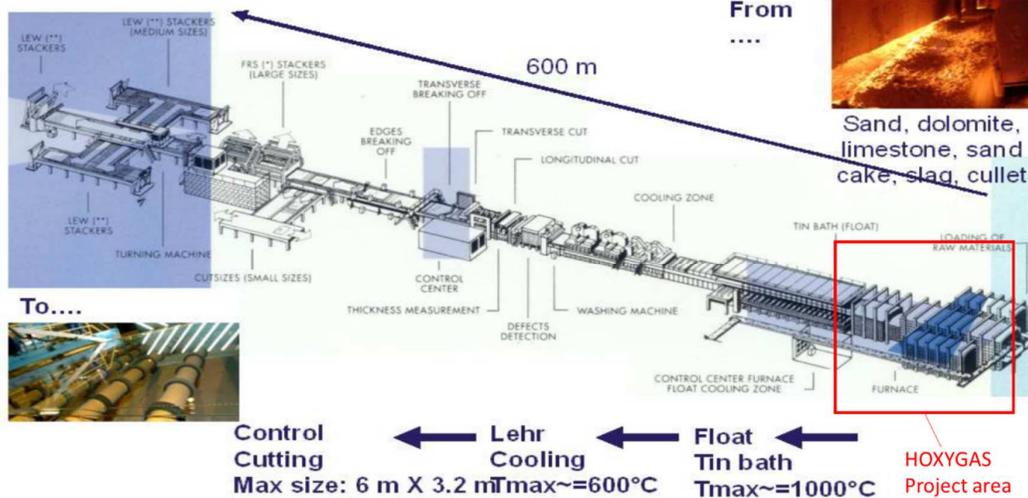
Afin d'assurer une production optimale, avec un haut niveau de qualité pour ce type de verre, tout en réduisant autant que faire se peut l'impact environnemental associé, le développement d'un concept novateur de four à oxy-combustion fut l'objectif de ce projet. Après le succès de son implémentation, le processus a pourra être adapté à d'autres processus de production faisant intervenir les fours à fusion, comme les aciéries ou cimenteries, connues pour leur forte émission de CO₂.

C'est dans ce contexte que prend place le principal challenge environnemental du projet HOxyGas, la réduction des émissions de CO₂ et de la consommation d'énergie pour produire du verre automobile grâce à la technologie innovante d'oxy-combustion mentionnée ci-dessus, utilisant un oxygène préchauffé comme oxydant et un gaz naturel préchauffé comme combustible.

Le projet HOxyGas: Objectif et résultats attendus

Le projet HOxyGas s'est concentré sur 2 aspects majeurs: la réduction de la consommation de combustible fossile et la réduction des émissions de GES liées à la production de verre automobile. Ainsi, avec ce projet, nous avons souhaité limiter l'impact des activités industrielles sur les changements climatiques. Limiter la consommation énergétique et les émissions de GES a toujours constitué un défi pour l'industrie. Par exemple, au cours des 5 dernières années, l'industrie du verre a réduit son utilisation de fioul. Ainsi, aujourd'hui, le taux de fours opérant complètement au gaz a atteint au moins 95%. Avec ce projet, nous avons proposé une solution innovante, basée uniquement sur l'utilisation de gaz naturel chaud, d'oxygène et de l'oxy-combustion à haute température. Bien que le projet se soit concentré sur le verre automobile, il est cependant envisageable que cette technologie, si validée, puisse être adaptée aux productions d'autres types de verre. Le processus aura un impact environnemental plus faible que toutes les technologies existantes.

Le schéma ci-dessous représente la ligne de production de verre flottant. Le projet HOxyGas s'est porté sur la partie liée au four, en implémentant et démontrant une technologie innovante d'oxy-combustion utilisant seulement le gaz naturel comme source d'énergie.



40 MW \approx 20 000 domestic boilers

Le projet HOxyGas a souhaité démontrer la maturité et le potentiel de cette nouvelle technologie en produisant du verre automobile coloré de haute qualité (en effet, ce verre particulier est soumis à des contraintes qualité plus strictes que le verre architectural), à l'aide de gaz naturel comme combustible unique (une atmosphère plus corrosive, un effet fumé à la surface du verre qui est plus marqué). Comparé à l'état de l'art (qui se base sur une technologie 100% air-combustion), les résultats quantitatifs suivant étaient attendus à haut et faible tirage :

	Haut tirage (verre transparent): 600 T/jour	Faible tirage (verre teinté): 500 T/jour
Réduction énergie de fusion	19.7%	18.3%
Réduction émissions CO2 (incluant les émissions liées à la production d'O2)	5.5 %	5.5 %
Réduction émissions NOx	79.2%	79.2%
Reduction émissions SOx	34.5%	34.5%
Réduction émissions poussière	67.7%	67.7%

Il est important de noter que, contrairement à ce qui fut initialement prévu, le verre transparent n'a pas été produit, à cause d'une demande du marché faible durant la durée du projet, et il fut remplacé par un verre teinté vert clair. Ainsi, durant le projet, le four n'a fonctionné qu'à faible tirage (500 tonnes par jour).

Partenaires du projet

Bénéficiaire coordinateur – AGC Flat Glass Czech, la verrerie la plus importante en Europe Centrale

Installée à Teplice (Bohème du Nord), AGC Flat Glass Czech est le plus important producteur de verre plat et de ses applications en Europe Centrale. La société gère des usines de production en Tchéquie, des centrales d'achat en Europe Centrale ainsi que des usines de transformation en Tchéquie, Slovaquie et Pologne. En plus de ses infrastructures de transformation du verre architectural, de miroirs et de verre décoratif, les activités tchèques reposent sur 3 usines de verre plat situées à Teplice et une usine de verre automobile à Chuderice. AGC emploie environ 4500 personnes en Tchéquie et se classe régulièrement parmi le top 5 des employeurs du pays.



Bénéficiaire associé – AGC Glass Europe, un leader du verre plat

Basé à Louvain-la-Neuve (BE), AGC Glass Europe produit, transforme et distribue du verre plat pour la construction (esthétique extérieure et décoration intérieure), l'automobile et l'énergie solaire. Il s'agit de la section européenne d'AGC, le plus gros producteur de verre plat au monde.

Son cœur de métier, "Glass Unlimited", reflète bien les possibilités offertes par :

- Le verre comme matériau pouvant combler une large gamme diversité de besoins (confort, contrôle énergétique, santé et sécurité, esthétique) ;
- L'innovation de produits et processus, grâce à des recherches constantes dans les technologies de verre avancé ;
- Plus de 100 sites en Europe, de l'Espagne à la Russie ;
- Un réseau marketing mondial ;
- Ses 16 000 employés.



2. La technologie de fusion innovante proposée par le projet HOxyGas

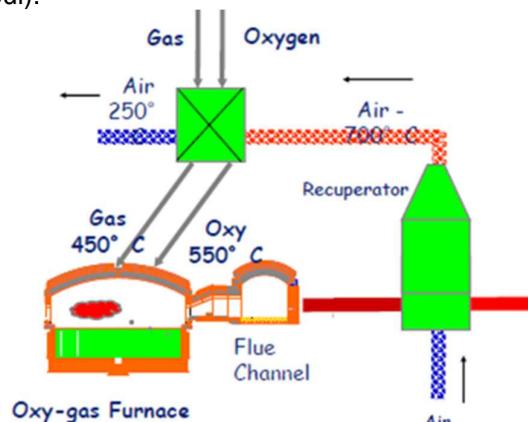
Le processus usuel de fabrication du verre plat automobile fait intervenir l'air-combustion régénératif : l'oxydant utilisé est l'air, composé de 21% de O₂ et 79% de N₂. La combustion du gaz naturel (principalement du méthane CH₄) peut être exprimée à travers la réaction suivante :



Le CO₂ et l'eau H₂O, produits de cette combustion, participant au transfert de la chaleur vers le verre tandis que l'azote (N₂) ne servira que de charge calorifique perdue dans les fumées qui s'échappent par l'évent. Dans une technologie utilisant l'air-combustion classique, des régénérateurs en structure alvéolaire sont utilisés de part et d'autres du four pour récupérer les pertes énergétiques par les fumées chaudes, et vont transférer une partie de cette énergie vers la combustion. Cependant, l'efficacité énergétique d'un tel procédé reste faible puisque 35 à 40% de l'énergie utile est perdue.

En plus d'être une source d'énergie perdue, il est important de noter que le N₂, à très haute température (c'est le cas au sein d'une flamme de combustion) produit des polluants NOx.

Dans le but d'optimiser l'efficacité du processus et de limiter l'impact environnemental lié à l'air-combustion standard, AGC a cherché, comme solution potentielle pour améliorer simultanément la consommation d'énergie et l'empreinte environnementale, à utiliser l'oxygène pur au lieu de l'air et le gaz naturel comme combustible (les niveaux d'émissions de CO₂ en utilisant du GN sont plus faibles que ceux provenant de l'utilisation du fioul).



Les 2 principaux aspects innovants (voir la figure ci-dessus) introduits par la technologie de l'oxy-combustion à haute température sont :

1. La combustion avec l'oxygène comme seul oxydant, limitant ainsi les pertes énergétiques et la production de NOx ;
2. Le préchauffage de l'oxygène (jusqu'à 550°C) et du gaz naturel (jusqu'à 450°C) pour accroître l'efficacité énergétique du four, avec une approche en deux temps :
 - i. Des récupérateurs d'air/de fumées : l'énergie est transférée depuis les fumées chaudes provenant du four vers un flux d'air.
 - ii. Des échangeurs d'air/de réactifs : un flux d'air préchauffé est distribué à l'intérieur de chaque brûleur entre deux échangeurs :
 - i. Air/Oxygène
 - ii. Air/Gaz naturel

Enfin, les réactifs préchauffés se dirigent jusqu'aux brûleurs au travers d'une voie isolée.

Cette approche en deux temps se justifie par son caractère sécuritaire, en effet elle permet d'éviter tout risque de fumée se mélangeant à l'oxygène en cas de fuite dans l'échangeur de chaleur terminal.

1ère application industrielle: la combustion hybride (fioul + GN)

Une première application industrielle a eu lieu à Boussois (FR), à partir de 2008, dans le but de valider la faisabilité de la production de verre transparent de bonne qualité à des fins architecturales, par une combustion hybride, utilisant partiellement le fioul et le gaz naturel, et pas uniquement du gaz naturel comme dans le cas d'HOxyGas.

Durant cette première expérience, AGC Glass Europe a évalué et validé les aspects techniques. Ces derniers incluaient la conception de la technologie et la sélection des matériaux (fours, brûleurs, réfractaires) ; les contraintes de sécurité liées à l'utilisation d'oxygène chaud ; le paramétrage de la fusion du verre (courbe de température, atmosphère interne du four, gestion des fumées).

Les intérêts environnementaux et énergétiques ont également été caractérisés.

Ce premier projet fut financé par le programme LIFE+ de la Commission Européenne - HotOxyGlass LIFE07 ENV/F/000179.

Challenges additionnels spécifiques liés au projet HOxyGas

Contrairement à la première expérience menée à Boussois, le projet HOxyGas, qui s'est déroulé en Tchéquie dans l'usine de Retenice, a eu comme objectif majeur de démontrer les avantages environnementaux de l'oxy-combustion utilisant seulement comme combustible le gaz naturel. Les principaux défis à relever pour atteindre les résultats attendus ont été :

- Une plus grande quantité d'eau présente dans l'atmosphère du four (~ 1/3 CO₂v; 2/3 H₂Ov) à cause de la combustion de l'oxygène et du gaz naturel (pas de dilution par l'azote) :
 - Un plus gros volume d'eau dans l'atmosphère du four en contact avec la surface du verre à haute température va accentuer l'évaporation d'espèces chimiques corrosives telles que le NaOH. De plus, comme le flux de fumées de combustion est amoindri grâce à cette technologie, la concentration de ces espèces chimiques est accrue.
 - La diffusion d'eau depuis l'atmosphère vers le verre chaud peut modifier les propriétés du verre, comme la température de courbure. De plus, si le volume d'eau augmente, les conditions au sein du verre changent, et la réaction chimique est modifiée, générant une épaisse couche de fumée à la surface du bain de verre. Cette couche a un impact sur la qualité et la consommation d'énergie en agissant comme une couche isolante. Enfin, les échanges de diffusion en aval du four sont accentués comme dans le bain d'étain.
 - A cause d'un transfert de chaleur depuis la flamme générée par la nouvelle technologie vers le nouveau four, de nouveaux profils de températures et courbes de cuisson doivent être adoptés pour assurer les contraintes de qualité du produit final.
- Production de verre automobile :
 - Le marché automobile est soumis à des contraintes qualité plus strictes, sur un plus large panel de produits, que le marché architectural. Le marché automobile requiert du verre teinté (de couleur claire ou foncée), qui peut être soumis à de nombreux processus (laminage, renforcement) pour la fabrication de produits finaux. Chaque couleur de verre amène de nouveaux ajustements de la technologie de mélange pour atteindre le régime thermique optimal et les contraintes qualité.

3. Principales activités du projet et accomplissements

Le projet HOxyGas fut implémenté avec succès entre juin 2012 et janvier 2017. Afin d'atteindre les objectifs du projet, deux phases ont été conduites :

1. Phase de conception et construction (juin 2012 – avril 2014);
2. Phase d'échauffement, de mise en route et de fonctionnement (mars 2014 – janvier 2017).

Phase de conception et construction



La conception et la construction de la structure des fours (travail civil, structure métallique et réfractaires) ont été achevées mi-mars 2013 et tous les permis requis ont été obtenus. Cependant, en avril 2013, le lancement du four a dû être reporté à avril 2014 à cause du contexte économique du marché du verre plat. L'appareil cryogénique (production O₂/N₂) fut finalisé et mis en route en même temps que le four (avril 2014). En vue de préparer la seconde phase du projet, les activités



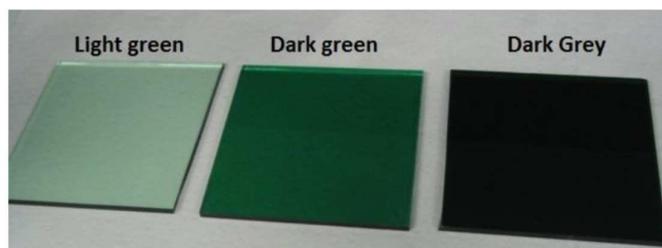
suivantes ont aussi été entreprises par AGC Glass Europe R&D durant cette phase :

- Développement de modèles numériques pour le comportement du four et la définition des courbes de chaleur pour les différentes couleurs de verre lors des phases de démarrage.
- Conditions d'échauffement du four, analyses réfractaires.
- Définition de la composition des matières premières pour le démarrage;
- Développement d'une analyse méthodologique pour le contrôle qualité du verre.

Phase d'Echauffement, de démarrage et opérationnelle

L'échauffement du four et du bain d'étain ont débuté en mars 2014, et le four entier a pu être opérationnel le 22 avril 2014. Après 3 semaines d'opération avec des réactifs à froid, le four a commencé à fonctionner en oxy-combustion en mai 2014 pour la teinte vert clair.

A la suite d'activités dont l'objectif était d'optimiser le processus et d'assurer une production de verre de haute qualité, alignées sur les contraintes du marché automobile, le four pilote est maintenant totalement opérationnel, utilisant l'oxygène et le GN à haute température pour une capacité de 500-520 tonnes/jour de verre. Il a été validé pour 7 teintes différentes (du vert clair au foncé, gris foncé et gris très foncé), pour une épaisseur allant de 2,1 à 10 mm (laminé et renforcé).



Les économies réalisées grâce à ces technologies innovantes sont résumées dans le tableau ci-dessous et sont globalement meilleures que les résultats attendus.

% économies vs Air-gaz	Economies d'énergie	CO ₂ *	NO _x Verre vert	SO _x	Poussière
Résultats attendus à faible capacité (500 T/j)	18.4%	5.5%	79.2%	35.5%	67.7%
Résultats actuels à faible capacité	18.7% +/-3%	5% +/-3%	85%	82%	83%

4. Bénéfices du projet à long terme et prochaines étapes

Bénéfices environnementaux

Durant le projet HOxyGas, les deux partenaires ont permis d'établir les bénéfices environnementaux suivant concernant la technologie, plus particulièrement en termes de combustible et de réductions d'émissions de CO₂ :

- 5.4 MNm³/an de gaz naturel économisé;
- Jusqu'à 4,800 T CO₂/an économisé (incluant le CO₂ émis lors de la production d'O₂) ;
- 745,000 T NO_x/an (verre sans nitrates)
- 220,000 T SO_x/an.

Bénéfices économiques

De point de vue économique, le projet a permis la création de 67 emplois et la sécurisation sur le long terme d'un nombre certain d'emplois pour les deux entités.

Le système innovant installé permet des économies certaines en GN. Ainsi, en termes de retour sur investissement, l'oxy-combustion innovante est fortement dépendante du prix des ressources requises que sont l'oxygène et le GN.

Prochaines étapes: répliquabilité et transférabilité

Dans le but de faciliter une répliquabilité et un transfert de la technologie d'oxy-combustion, les deux entités continueront les activités de dissémination pour promouvoir les forts impacts environnementaux d'une telle technologie :

- Participation à des événements tels que : conférences, expositions, salons;
- Le site internet du projet: <http://www.agc-hoxygas.eu/index.htm>;
- Le développement du réseau, en particulier avec les associations d'industries, et activités de standardisation.

En termes de répliquabilité des résultats, la technologie d'oxy-combustion sera évaluée à chaque projet de rénovation/réparation de four sur les aspects techniques et économiques comme une alternative à la combustion air/gaz de l'état de l'art. Cependant, comme mentionné ci-dessus, il est important de noter que **la pertinence économique de cette technologie est étroitement liée aux prix de l'énergie à une échelle locale (gaz, électricité).**

En particulier, l'un des fours de l'usine AGC de Boussois sera remis en marche en Avril 2017 (après une période d'arrêt de 3 ans suite à une crise du marché) en mode oxy-combustion, utilisant à 100% du gaz naturel grâce aux activités réalisées pendant le projet HOxyGas.

Cette technologie serait en théorie répliquable dans les autres usines de fabrication de verre plat (en dehors du groupe AGC) ; les activités de dissémination entreprises par AGC encouragent les autres fabricants de verre à s'essayer à ces technologies respectueuses de l'environnement, menant à des réductions des émissions de CO₂ et de la consommation d'énergie ainsi qu'à des bénéfices économiques.

En ce qui concerne la transférabilité, une telle technologie est théoriquement transférable à une large variété d'applications dans le secteur du verre (autres types de verre), mais aussi du ciment, de la fabrication d'acier et l'industrie céramique, moyennant quelques études d'ingénierie R&D. AGC, en tant que fabricant de verre, n'a pas directement pour activité le transfert à de telles applications, cependant la dissémination des résultats du projet HOxyGas (voir ci-dessus) ouvrira la voie à l'évolution de cette technologie innovante et respectueuse de l'environnement.