

Vers des vitrages intelligents et connectés pour des bâtiments durables et confortables

Stéphane Auvray est docteur dans le domaine de la physique du solide. Après avoir été directeur de la Recherche et du Développement de l'Unité « vitrages de façade » de Saint-Gobain¹, il est depuis 2019 directeur commercial de la filiale SageGlass France², qui commercialise les vitrages à teinte variable de technologie électrochrome.

Les matériaux sont importants dans les enjeux actuels de qualité de vie au travail, de durabilité et de réduction de l'empreinte carbone, et ces tendances sont reliées aux grandes évolutions attendues dans le bâtiment. Le verre est un matériau particulièrement

utilisé dans l'architecture moderne, notamment pour donner une identité architecturale aux bâtiments et les rendre plus confortables (**Figure 1**).

↑ Le bâtiment : évolution et problématiques

Les bâtiments actuels ne sont pas tous durables et confortables, et Saint-Gobain a développé pour les façades en verre

1. Saint-Gobain conçoit, produit et distribue des matériaux et des solutions pensés pour le bien-être de chacun et l'avenir de tous.

2. www.sageglass.com/fr

Figure 1

Les bâtiments actuels sont-ils durables ?

Source : © SageGlass - Adrien Barakat.



Figure 2

Les anciennes maisons avaient des murs très épais en pierre.

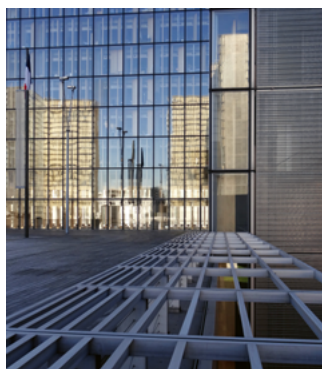


Figure 3

La bibliothèque François Mitterrand est faite de bâtiments modernes entièrement constitués de verre.

Les maisons anciennes étaient construites en pierre, avec des murs épais. La pierre était directement extraite du sol et l'empreinte carbone consistait à l'installer, donc était très limitée. Les fenêtres étaient petites, avec peu d'apport de lumière naturelle, les bâtiments étaient donc relativement tristes et peu confortables, mais en été ces maisons avaient l'énorme avantage, avec leurs murs épais et un peu humides, d'être fraîches. Par contre pendant l'hiver, il y avait une telle inertie du bâtiment que chauffer ce type de maison était très compliqué et coûteux (Figure 2).

Avec le temps, les bâtiments ont changé de forme et les façades des bâtiments modernes sont entièrement en verre (Figure 3), matériau qui a l'énorme avantage de laisser passer la lumière, mais l'inconvénient de laisser aussi passer la chaleur. Ces nouveaux bâtiments sont très confortables en termes de confort visuel, mais avec parfois des risques d'éblouissement et il fait souvent très chaud à l'intérieur, notamment l'été.

On incrimine souvent le verre et l'effet de serre, or, le problème

un nouveau produit électrochrome³ afin d'apporter des améliorations dans ce sens (Figure 1).

Il faut rappeler que le bâtiment est énergivore : l'empreinte énergétique des bâtiments est en moyenne de 33 % et va jusqu'à 40 % en France. De plus, 40 % des émissions de CO₂ sont induits par les matériaux de construction.

3. Électrochrome : se dit d'un matériau ayant la propriété de changer de teinte de manière réversible par une réaction d'oxydo-réduction.

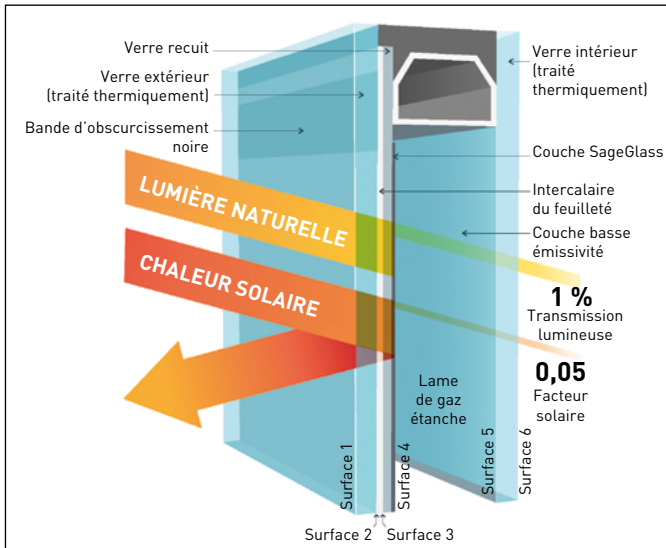


Figure 4

La protection solaire dans les façades de verre (exemple de configuration d'un double-vitrage électrochrome Sageglass, état teinté).

Source : © SageGlass.

ne vient pas du verre mais d'une mauvaise gestion de la protection solaire de ces façades.

Dans les bâtiments à façades en verre, la protection solaire consiste à gérer l'apport de lumière naturelle (appelée Transmission Lumineuse, TL) et l'apport d'énergie solaire (appelée Transmission Énergétique, TE) (Figure 4). La transmission lumineuse correspond à la partie visible du spectre, celle qui permet de voir le monde qui nous entoure. La transmission énergétique correspond à l'ensemble du spectre solaire allant du visible jusqu'à la partie infrarouge des rayons du soleil. Elle reflète les calories qui sont transmises dans le bâtiment. Si l'on ne place pas de filtres interférométriques adaptés sur le verre de manière à réfléchir l'infrarouge vers l'extérieur, l'énergie solaire transmise et piégée dans le bâtiment crée un effet de serre.

Le store est une des protections solaires classiques connues par tous. Comme le verre, le store a été inventé dès l'Égypte

antique il y a 3 000-4 000 ans. Les Égyptiens utilisaient des bambous coupés en deux pour fabriquer des stores à lamelles. Cette protection solaire est certes très ingénieuse mais elle ne gère que partiellement les zones d'ombre et de lumière (Figure 5), et ne permet pas une protection parfaite contre l'éblouissement.

De plus, si le store est posé à l'intérieur du bâtiment et non pas à l'extérieur, les calories rentrent dans le bâtiment et le store intérieur devient un véritable radiateur solaire : plus on

Figure 5

L'utilisation des stores dans les bâtiments permet de gérer partiellement l'entrée de lumière.

Source : © SageGlass.



The New York Times

**The World Wants Air-Conditioning.
That Could Warm the World.**

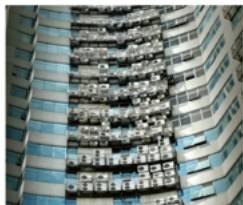


Figure 6

The New York Times et l'impact des climatiseurs : « Le monde veut de l'air conditionné qui pourrait chauffer le monde ».

Source : New York Times.

Figure 7

Aujourd'hui, plus de 50 % de la population mondiale vit dans les villes ; d'ici 2050, ce taux passera à près de 70 %.

met de stores pour se protéger du soleil, plus on chauffe finalement le bâtiment. Si à cela s'ajoutent les problèmes mécaniques des stores qui se bloquent, on constate rapidement que le bon vieux store n'est plus une technologie satisfaisante ; elle n'est pas non plus innovante puisqu'elle date de l'Égypte antique.

Climatiser des bâtiments trop chauds ne résout pas non plus le problème. D'une part, elle rend les bâtiments encore plus énergivores, et, comme le souligne le New York Times (**Figure 6**), les pics de consommation d'énergie ne sont plus atteints en hiver mais en été.

D'autre part, la climatisation engendre un véritable cercle vicieux. Refroidir un bâtiment consiste à transférer des calories de l'intérieur des bâtiments vers l'extérieur au prix d'une consommation d'énergie. Plus il fait chaud, plus il faut climatiser ! Les climatisations contribuent alors à réchauffer

l'air extérieur, ce qui pose de gros problèmes, notamment en milieu urbain où s'observent de plus en plus les phénomènes d'ilots de chaleur. Il y a déjà 1,5 milliards de climatiseurs dans le monde, on estime qu'il y en aura 6 milliards en 2050, ce qui correspond, en plus d'une élévation de la température extérieure, à une consommation d'énergie équivalente à celle de l'Union européenne, le Japon et les États-Unis aujourd'hui s'ils fonctionnent tous en même temps.

2 Les défis du bâtiment dans notre société

2.1. L'impact du bâtiment sur notre bien-être et notre santé

La société moderne est confrontée à la migration des populations vers les villes et à l'augmentation du nombre de tours dans lesquelles les citadins des grandes villes passent 90 % de leur temps (**Figure 7**) ;



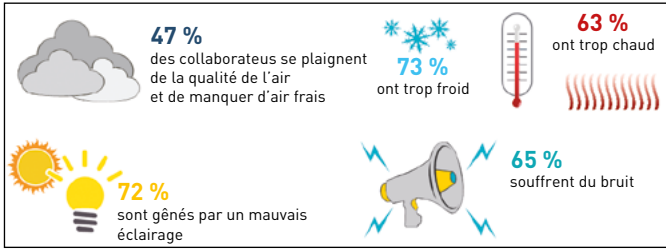


Figure 8

Les nuisances au travail dans les bureaux.

Source : © SageGlass.

plus de 50 % de la population urbaine vit dans des villes de plus de 500 000 habitants. Par rapport aux zones rurales, les villes sont associées à des taux plus élevés de problèmes de santé mentale ; en plus de la solitude, de l'isolement et du stress, le risque de dépression est 40 % plus élevé, l'anxiété est 20 % plus fréquente et le risque de schizophrénie est doublé.

Cet impact sur la santé mentale qui n'avait pas été anticipé commence à être mieux compris. Une analyse a été réalisée par Ayming-AG2R La Mondiale. Les auteurs évaluent que nous passons 60 % du temps journalier sur notre lieu de travail. Un cinquième des salariés serait affecté par des problèmes de santé mentale. Au total, le coût annuel de l'absentéisme en France s'élèverait à 100 milliards d'euros.

Cette étude fait prendre conscience de l'importance que le confort peut avoir sur le bien-être mental et que l'inconfort induit un coût pour la société : les nuisances liées au travail dans les tours de bureaux perturbent l'attention et créent des phénomènes d'anxiété qui ne sont plus évacués comme auparavant par le contact avec la nature.

Les sondages montrent que 47 % des personnes au travail

se plaignent de la mauvaise qualité de l'air, qui contient trop de CO₂ et entraîne des défauts de concentration, ainsi qu'une perte d'efficacité. La température mal régulée des locaux, mais surtout la lumière, sont les nuisances les plus ressenties (Figure 8).

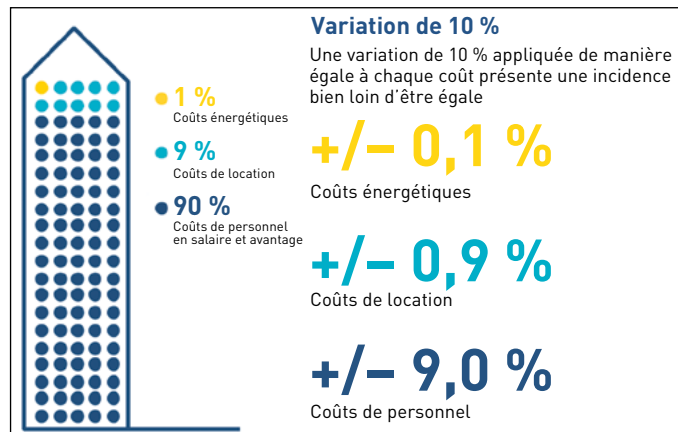
Les fabricants de matériaux ont essayé de comprendre comment y remédier et les avantages apportés par une amélioration du confort au travail. La Figure 9 montre qu'investir dans le bien-être et la performance des salariés est en fait bien plus rentable qu'un investissement visant à améliorer l'efficacité énergétique des équipements, voire une réduction du loyer.

Les performances au travail peuvent donc être reliées à la notion de performance des

Figure 9

Avantages et bienfaits du confort sur les lieux de travail.

Source : Productivity & Health Benefits. The Business Case for Green Building, World Green Building Council, 2013.





BIEN-ÊTRE
& CONFORT



DURABLE
& RÉDUCTION de la
CONSUMMATION
D'ÉNERGIE



CONNECTÉ &
INTELLIGENT

Figure 10

Les défis actuels du bâtiment.

Source : © SageGlass.



Figure 11

Les vitres de la façade dans le bâtiment jouent un rôle majeur.



Figure 12

Il est important de laisser entrer le maximum de lumière naturelle.

matériaux des bâtiments via le confort et le bien-être des utilisateurs. Les fabricants de matériaux comme Saint-Gobain sont en train de réviser leurs analyses des besoins, et parlent de plus en plus aux personnes qui vivent dans les bâtiments.

2.2. Les besoins des bâtiments modernes

Les besoins des bâtiments modernes reposent sur trois piliers (Figure 10) :

- la durabilité et la réduction de l'empreinte carbone : il faut que les bâtiments consomment moins d'énergie, que les matériaux utilisés soient produits de manière plus durable et qu'ils soient recyclables ;
- le confort et le bien-être au quotidien sont des valeurs qui doivent être comprises et prises en compte ;
- l'intelligence artificielle est de plus en plus utilisée, surtout pour les nouvelles générations. Avec l'arrivée de la voiture électrique, on est en train de marier deux modèles qui étaient complètement découplés : la mobilité avec l'immobilier.

Les enjeux sociaux et économiques conduisent donc à repenser les bâtiments et leur conception pour apporter plus de bien-être et de santé à leurs occupants, et dans ce cadre, la lumière naturelle, la vue et le contact avec la nature jouent un rôle important. Les vitrages de la façade d'un bâtiment jouent donc un rôle majeur dans cette évolution (Figure 11).

Pour diminuer le stress, augmenter les capacités cognitives et la concentration, il faut laisser entrer le maximum de lumière naturelle (Figure 12).



Figure 13

La lumière naturelle et la vue vers l'extérieur : bénéfices observés.
Source : © SageGlass.

Dans cet objectif, Saint-Gobain a mis au point un produit de façade électrochrome.

La **Figure 13** résume les effets positifs de la lumière naturelle et de la vue sur l'extérieur.

L'analyse précise de ces effets (**Figure 14**) a montré leur impact fort sur tous les mécanismes de productivité non seulement dans les bureaux mais également dans les secteurs hospitaliers où, par exemple, le temps de séjour des patients peut être réduit de 8 à 10 % dans des pièces très lumineuses. De même, alors que des étudiants qui travaillent dans un espace insuffisamment éclairé perdent en concentration et en productivité, lorsqu'ils sont mis dans un espace bien éclairé avec un bon apport de lumière naturelle, cela entraîne une

amélioration des performances aux examens de 5 à 10 %.

Ce rôle fondamental de la lumière naturelle, connu depuis très longtemps, n'est pas pour autant toujours exploité, le vitrage intelligent est donc une solution pour répondre à ce besoin de lumière naturelle.

3 Les vitrages dynamiques et intelligents : une réponse aux enjeux de conception durable et biophilique ?

Idéalement, le bon vitrage est celui qui laisse passer la lumière et qui permet de filtrer l'infrarouge quand il fait chaud dehors, mais qui laisse passer l'infrarouge quand il fait froid. La **Figure 15A** présente

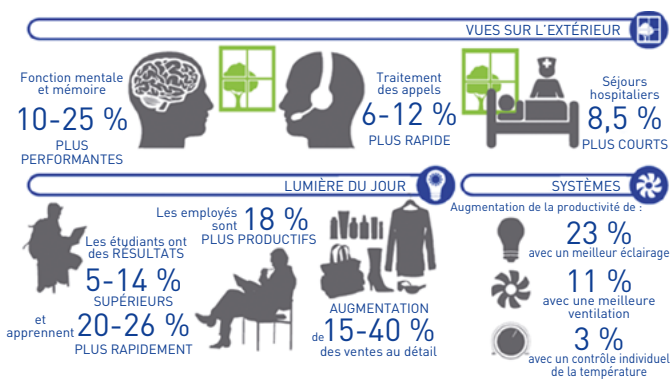


Figure 14

Les effets de la lumière du jour.
Source : The business case for green building report, World Green Building Council, 2013.



Figure 15

A) Verrière pour le confort d'hiver ;
 B) verrière pour le confort d'été.
 Source : © SageGlass, K. Khalfi.

l'exemple d'une verrière pour un confort d'hiver qui laisse passer à la fois la lumière visible du soleil et le rayonnement infrarouge. La **Figure 15B** montre l'exemple d'une verrière pour le confort d'été qui se teinte et permet à la fois de réduire l'exposition lumineuse et la quantité de chaleur.

Il existe des matériaux qui réagissent avec la quantité de lumière et la quantité de chaleur :

- les matériaux photochromes se teintent en fonction de l'intensité lumineuse ;

- les matériaux thermochromes se teintent en fonction de la température extérieure.

Mais ces matériaux thermochromes et photochromes ne sont pas pilotables et sont tributaires des conditions extérieures.

3.1. Les vitrages électrochromes

Saint-Gobain a misé sur la technologie électrochrome, qui consiste à piloter les propriétés optiques d'un vitrage en fonction des conditions extérieures. Ce sont des dispositifs à très faible consommation, qui fonctionnent sous une faible tension de l'ordre de 2,5 V avec des courants également faibles de l'ordre de 100 mA. La technologie électrochrome est construite à partir d'un empilement de couches de matériaux sur un substrat de verre (**Figure 16**).

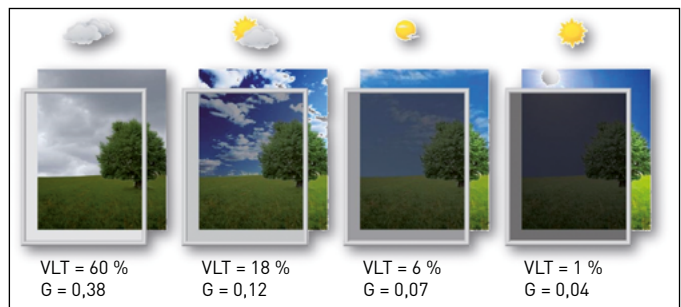
Cinq couches permettent de construire un vitrage électrochrome (**Figure 17**) :

- une électrode transparente, qui doit être capable de transporter le courant mais aussi permettre de laisser passer la lumière ;
- une électrode de travail qui se teinte lorsqu'elle est soumise à un potentiel. Plusieurs matériaux possèdent cette propriété,

Figure 16

L'évolution des vitrages en fonction des conditions extérieures.

Source : © SageGlass.



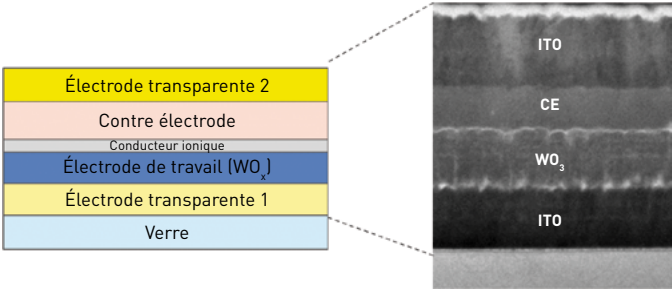


Figure 17

Les différentes couches d'un empilement électrochrome.
Source : © SageGlass.

et nous avons choisi des matériaux de la famille des oxydes de tungstène (WO_x) du fait de leur durabilité et de leur réversibilité ;

- un conducteur ionique qui laisse passer les ions mais bloque le passage des électrons ;
- une contre électrode qui permet d'amplifier le changement de teinte de l'électrode de travail ;
- une électrode transparente pour terminer le dispositif.

celui-ci se teinte *via* un processus d'oxydo-réduction qui se produit à la fois sur l'électrode de travail en tungstène et sur la contre électrode : sous l'effet du champ électrique, les ions lithium migrent, et il y a réduction de l'électrode de tungstène et oxydation de la contre électrode. La batterie chargée est teintée. La singularité de ce dispositif est finalement d'avoir un matériau qui se réduit pendant que l'autre s'oxyde, mais que les deux se teintent en même temps.

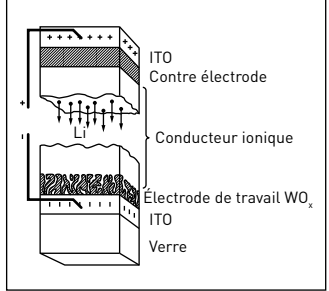


Figure 18

Schéma de fonctionnement d'une batterie au lithium. Sous l'effet d'un champ électrique, le lithium migre. Il y a réduction de l'électrode de travail WO_x et oxydation de la contre électrode. La batterie se charge et le vitrage se teinte.

Cet empilement de cinq couches très fines a une épaisseur globale de l'ordre du micromètre. Le principe de fonctionnement d'une couche électrochrome présente des similarités avec celui d'une batterie au lithium, avec malgré tout une différence majeure : il s'agit dans le cas des vitrages d'une batterie transparente (**Figure 18**). L'état clair du vitrage correspond à un état où la batterie est déchargée. Quand on charge « le vitrage »,

Tout l'enjeu du point de vue de la chimie est d'une part de faire migrer le lithium correctement dans un dispositif en minimisant les courants de fuite, et d'autre part d'avoir deux matériaux qui se teintent simultanément pour obtenir un bon contraste, comme on le voit sur la **Figure 19**.

Figure 19

Filtrage de la lumière naturelle par les vitrages électrochromes.
Source : © SageGlass - Adrien Barakt.



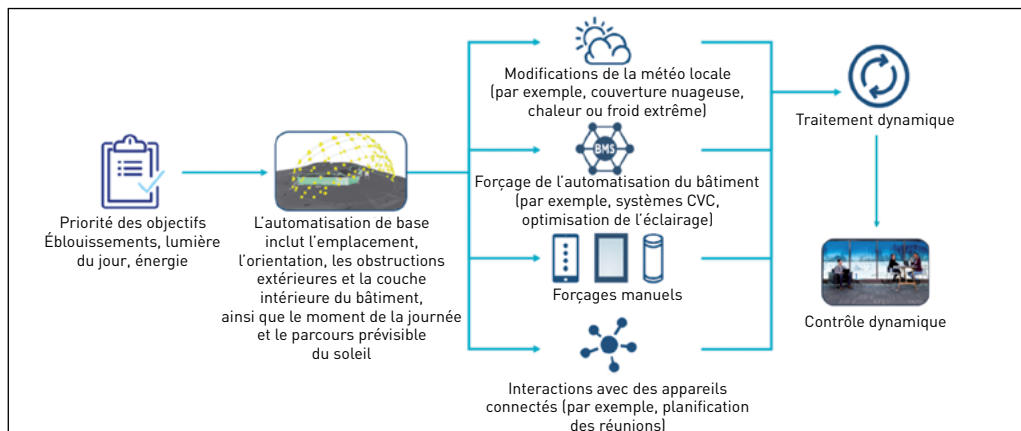


Figure 20

L'apport de la peau intelligente au bâtiment intelligent.

Source : © SageGlass.

3.2. Confort visuel, thermique et acoustique

Le principe de fonctionnement des vitrages électrochromes est simple : c'est une batterie qui est fortement teintée quand elle est chargée, et qui devient transparente quand elle est déchargée. Les états de charges intermédiaires qui conduisent à des états de teintes intermédiaires sont également tous accessibles. À l'état chargé, le vitrage électrochrome pourra alors filtrer 96 % de l'infrarouge et 99 % de la lumière. À l'état déchargé, il restera une protection solaire de qualité.

Ce vitrage électrochrome remplace donc avantageusement le store en limitant les problèmes de bruit et de maintenance. De plus, cette technologie permet d'innover dans la manière de transmettre le couple lumière et chaleur dans les bâtiments. Il est par exemple possible de

diviser le vitrage en une deux ou trois zones pilotables séparément voire créer des gradients de teinte sur le même vitrage, ce qui permet de suivre le soleil dans sa course, en pilotant la zone teintée de la manière la mieux adaptée au confort des utilisateurs. C'est aussi un élément de design apprécié des architectes qui permet également de réduire la consommation d'énergie du bâtiment. On parle de vitrage intelligent parce qu'il est connecté et piloté par ordinateur, et la façade du bâtiment joue alors le rôle d'une peau dynamique (Figure 20).

Cette peau dynamique peut être couplée avec la climatisation, le chauffage et l'éclairage des bâtiments. On peut ainsi obtenir des réductions de consommation d'énergie grâce à la synergie des systèmes sur des bâtiments équipés de notre vitrage allant jusqu'à 20 à 30 %.

Quand le vitrage du futur devient celui d'aujourd'hui

Ces nouveaux produits ouvrent une nouvelle ère qu'on appelle la peau dynamique des bâtiments. Cette peau dynamique est connectée au « bâtiment intelligent », domaine qui va devenir un bassin d'emploi important, utilisant de



Figure 21

Exemple de vitrages installés sur des bâtiments en Europe
 A-B) Tombola, UK. © SageGlass James Newton ; C) Lidl, Allemagne. © Lidl Germany ; D) Siège de Nestlé, Vevey, Suisse ; E) TIPEE, La Rochelle, France. © SageGlass K. Khalfi.

nouveaux outils technologiques dans lesquels la chimie et la lumière seront largement présents.

L'aventure vient de démarrer avec les premiers bâtiments. Plusieurs milliers de mètres carrés de façades ont déjà été réalisés, c'est donc une technologie mature (**Figure 21**). Mais on peut parler d'une aventure parce que c'est encore une approche assez inhabituelle qui casse un certain nombre de codes dans le monde du bâtiment.