

Veille Technologique & Intelligence Economique

---

# Le SmartGlass pour le vitrage intelligent : les apports de l'électronique imprimée

---

Thomas BŒUF, Maria DUBILE et Anatole MANTEL

Etudiants à Grenoble INP – Pagora en Ingénierie de la Communication Imprimée

2019

# Table des matières

|  |           |
|--|-----------|
| <b>I. Introduction</b>   | <b>4</b>  |
| <b>II. Contexte</b>  | <b>5</b>  |
| <b>1. Objets connectés</b>   | <b>5</b>  |
| <b>2. Focus sur les vitrages intelligents</b>  | <b>7</b>  |
| <b>III. Rapport technique</b>  | <b>9</b>  |
| <b>1. La fonctionnalisation des vitrages</b>   | <b>9</b>  |
| 1.1. Historique sur les vitrages   | 9         |
| 1.2. Les enjeux liés à l'utilisation de vitrages intelligents                                      | 9         |
| 1.2.1. La domotique et l'esthétique  | 9         |
| 1.2.2. L'aspect énergétique (développement durable)  | 11        |
| 1.3. Technologies actuelles de vitrages intelligents   | 11        |
| 1.3.1. Technologie à cristaux liquides (LC)  | 11        |
| 1.3.2. Electrochromisme  | 12        |
| 1.3.3. Dispositifs à particules en suspension (SPD)  | 13        |
| 1.3.4. Comparaison des technologies  | 14        |
| <b>2. L'électronique imprimée</b>  | <b>15</b> |
| 2.1. Définition  | 15        |
| 2.2. Les procédés d'impressions  | 16        |
| 2.3. Les encres  | 18        |
| 2.4. Les substrats   | 20        |
| 2.5. Les applications  | 21        |
| 2.5.1. Les capteurs  | 21        |
| 2.5.2. Les OLEDs   | 22        |
| 2.5.3. Le RFID   | 23        |
| 2.5.4. Les batteries   | 24        |
| <b>3. L'électronique imprimée dans la fonctionnalisation des vitrages</b>                          | <b>25</b> |
| 3.1. Cahier des charges et problèmes techniques  | 25        |
| 3.2. Utilisation actuelle de l'électronique imprimée dans la fonctionnalisation des vitrages       | 25        |
| 3.3. Perspectives d'utilisation de l'électronique imprimée dans la fonctionnalisation des vitrages | 25        |
| <b>IV. Rapport économique</b>  | <b>27</b> |
| <b>1. Marché du vitrage</b>  | <b>27</b> |
| 1.1. Contexte législatif et réglementaire  | 27        |
| 1.2. Impact de la législation sur le marché du vitrage en termes de performances énergétiques      | 29        |
| <b>2. Marché de l'électronique imprimée</b>  | <b>32</b> |
| 2.1. L'électronique imprimée dans le monde   | 32        |
| 2.2. Evolution du marché de l'électronique imprimée  | 32        |
| 2.3. Les parts de marché selon les applications  | 34        |
| 2.4. Acteurs de l'électronique imprimée en France  | 36        |
| <b>3. Marché du vitrage intelligent</b>  | <b>38</b> |
| <b>V. Perspectives d'évolution</b>   | <b>40</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Variables essentielles</b>   | <b>40</b> |
| <b>2. Facteurs clés du développement</b>   | <b>41</b> |
| <b>3. Matrices SWOT</b>  | <b>41</b> |
| 3.1. Matrice SWOT 1 : Electronique imprimée pour vitrages intelligents par rapport aux procédés conventionnels | 41        |
| 3.2. Matrice SWOT 2 : Vitrages intelligents par rapport aux vitrages classiques                                | 42        |
| <b>4. Scénarios</b>  | <b>42</b> |
| 4.1. Scénario 1 : Optimiste  | 42        |
| 4.2. Scénario 2 : Tendancier   | 43        |
| 4.3. Scénario 3 : Pessimiste   | 44        |
| <b>VI. Conclusion</b>  | <b>44</b> |
| <b>VII. Table des figures</b>  | <b>46</b> |
| <b>VIII. Table des tableaux</b>  | <b>47</b> |
| <b>IX. Références bibliographiques</b>   | <b>47</b> |

# I. INTRODUCTION

Une multiplication du nombre d'objets de la vie quotidienne connectés à Internet est aujourd'hui observable. L'**Internet of Things (IoT)**, ou *Internet des Objets (IdO)* en français, désigne cette interconnexion. L'IoT touche de plus en plus de domaines du quotidien. Si les smartphones, tablettes, télévisions et autres sont depuis longtemps connectés, on trouve désormais également de l'électroménager connecté (aspirateurs, frigidaires, etc.), des voitures connectées, des bâtiments et même des quartiers connectés !

Le **Smart Building**, ou bâtiment intelligent, désigne une nouvelle génération de bâtiments qui intègrent du numérique. Ces bâtiments sont munis de nombreux capteurs qui permettent de mesurer des données comme la température, la luminosité, le taux d'humidité ou encore détecter des mouvements. Par le biais d'actionneurs, les appareils électriques du bâtiment sont contrôlés. Il peut s'agir d'allumer un éclairage, augmenter ou diminuer le chauffage, monter ou baisser un store, etc. Le **Smart Building** est donc naturellement associé à une dimension de domotique et de confort de l'habitant. Outre cet aspect de confort, un autre paramètre pousse la croissance de ce secteur : l'**aspect écologique**. Le **Smart Building** permet d'optimiser l'utilisation des ressources énergétiques des bâtiments (éclairage et chauffage notamment) et par conséquent de la réduire. En France, c'est le Grenelle de l'Environnement de 2007 qui constitue un tournant. La volonté de mettre en place la transition écologique s'applique largement au secteur de la construction.

En France, plus de 40% de la consommation énergétique vient du domaine de l'habitat. Si une part majeure de cette énergie est consommée, une part est gaspillée. Lorsque qu'il s'agit de déterminer les sources de déperditions thermiques dans les habitations, les vitrages sont souvent et depuis longtemps pointés du doigt. Or, il va de soi que des bâtiments sans fenêtres ne sont pas près de voir le jour, même dans un contexte de transition écologique à tout prix. Aujourd'hui, une solution se dessine : le **vitrage intelligent**, qui est une forme de **SmartGlass** (ou verre intelligent). Ce rapport tâchera de montrer que le vitrage n'est plus voué à n'être qu'une cause de déperditions d'énergie dans les bâtiments, bien au contraire.

Parallèlement, une technologie observe une croissance folle : l'**électronique imprimée**. Il s'agit d'une nouvelle façon de fabriquer des composants électroniques par le biais de procédés d'impression. Ceux-ci, par rapport aux procédés conventionnels de fabrication de composants électroniques, présentent l'avantage d'être plus productifs et à moindre coût. Dans un contexte où de plus en plus d'objets vont comporter des fonctionnalités électroniques du fait de la croissance de l'IoT, l'utilisation de l'électronique imprimée semble être amplement pertinente. Cette dernière fait l'objet d'un nombre croissant de publications et d'articles depuis plusieurs années, ce qui laisse penser que les performances des composants électroniques produits via l'électronique imprimée vont largement s'améliorer.

Ainsi, ce rapport tentera de répondre à une question : l'électronique imprimée est-elle la solution pour démocratiser les vitrages intelligents, qui permettent de réduire l'impact environnemental des bâtiments ?

Ce rapport débutera par une contextualisation de l'étude. Celle-ci sera suivie par un rapport technique retraçant l'historique des vitrages, les enjeux liés à l'utilisation des vitrages intelligents et les technologies de vitrages intelligents déjà présentes sur le marché, mais également la situation technique actuelle de l'électronique imprimée. Ensuite, un rapport économique s'intéressera aux marchés du vitrage, de l'électronique imprimée ainsi que du vitrage intelligent par le biais d'un diagramme de Porter. Enfin, les perspectives d'évolution seront étudiées grâce à des outils comme la matrice SWOT et la rédaction de différents scénarios hypothétiques.

## II. CONTEXTE

### 1. Objets connectés

---

Tout d'abord, un objet connecté est un objet physique équipé de capteurs et/ou d'une puce qui lui permettent de transcender son usage initial pour proposer de nouveaux services. Il s'agit d'un matériel électronique capable de communiquer avec un ordinateur, un smartphone ou une tablette via un réseau sans fil qui le relie à Internet ou à un réseau local. On parle aujourd'hui de l'**Internet of Things (IoT)**, autrement dit l'Internet des Objets. Avec un nombre croissant d'objets connectés à Internet, une communication entre nos biens "physiques" et le numérique est possible.

Les objets connectés sont au cœur des recherches technologiques depuis de nombreuses années. En effet, depuis le développement d'Internet, de nombreux chercheurs se sont rendus compte qu'il sera possible dans le futur de connecter les personnes entre-elles et même de les connecter aux objets.

C'est dans ce contexte que, en 2003, est lancé le premier objet connecté : la lampe DAL. Cette lampe a été développée par la société Violet fondé par Rafi Haladjian, le créateur du premier opérateur internet en France : FranceNet. Cet objet a pour fonction de proposer divers services comme la météo, le bourse, messages de couleurs... Cette lampe étant un précurseur de son domaine elle est encore très chère (vendue 790€ l'unité en 2003). A partir de ce moment, la course à l'innovation a été déclenchée pour conquérir le marché gigantesque de ces objets connectés.



Figure 1. La lampe DAL de la société Violet (Source : Journaldulapin.com)

On recensait en 2009, 2,5 milliards d'objets connectés dans le monde selon le cabinet d'études Gartner [11]. Ce dernier prévoit 30 milliards d'objets connectés à Internet d'ici 2020. L'Apple Watch, la montre d'Apple qui se connecte à un smartphone, est l'un des exemples les plus répandus d'objets connectés. On trouve également des caméras connectées qui permettent de surveiller son chien pendant que nous sommes au bureau ou de vérifier que l'on a bien éteint la lumière avant de partir.

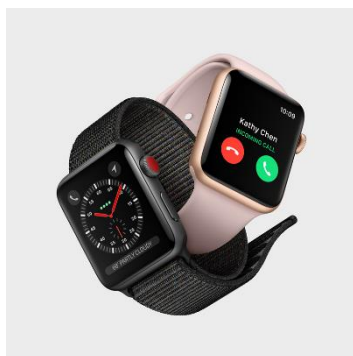


Figure 2. L'Apple Watch, la montre connectée d'Apple



Figure 3. La caméra connectée Withings

Des bracelets de santé qui permettent de contrôler la pression sanguine par exemple en temps réel sont également présents sur le marché, ainsi que des pèse-personnes connectés qui permettent une analyse corporelle, des systèmes de suivi de sommeil, et bien d'autres encore ! Le dernier exemple qui sera cité est le Parrot Flower Power qui offre un jardin connecté en envoyant des notifications concernant la santé et les besoins des plantes directement sur le smartphone !



Figure 4. Le Parrot Flower Power

## 2. Focus sur les vitrages intelligents

Les SmartGlass, ou verres intelligents, désignent un vaste domaine d'applications. Quelques exemples d'applications des verres intelligents sont donnés ci-dessous :

- Les **lunettes connectées** comme les Google Glass (2014) permettent d'utiliser la réalité augmentée [29]. Ces lunettes permettent d'utiliser certaines applications de Google comme Google Maps, Agenda, messages, météo, etc. grâce à une caméra intégrée, un micro, un pavé tactile, de mini-écrans ainsi qu'une connexion à internet.



Figure 5 : Les Google Glass (Source : Wikipédia)

- Des **miroirs connectés** permettent de lire des vidéos, regarder la météo, etc. sont disponibles pour quelques centaines d'euros. Par exemple, MySmartMirror [30], en vente à partir de £169, intègre un système Android permettant d'utiliser des applications comme Youtube ou Spotify. Il intègre également Alexa, un système de contrôle vocal.



Figure 6 : MySmartMirror (Source : [www.mysmartmirror.co.uk](http://www.mysmartmirror.co.uk))

- Des **retroviseurs intelligents** aux fonctionnalités multiples sont également disponibles. Gentex [31], une société américaine, propose des rétroviseurs intérieurs qui sont à la fois anti-éblouissement (qui s'assombrissent sous l'effet d'une lumière trop importante détectée par des capteurs pour éviter l'éblouissement du conducteur), à affichage (caméra de recul, température, etc.) et équipés de microphones (systèmes mains libres).
- Des **vitres intelligentes** utilisées dans le secteur du bâtiment à teinte variable permettent un confort de l'habitant et des économies d'énergie.

Le domaine d'applications des SmartGlass étant très large, ce rapport se concentrera sur une seule application : les **vitres intelligentes à teinte variable** pour le bâtiment. Ce choix semble intéressant du fait des grandes surfaces que le vitrage représente et donc de la pertinence de l'application de l'électronique imprimée à ce secteur. Les différentes technologies utilisées aujourd'hui pour développer de tels produits seront étudiées, de même que la perspective d'application de l'électronique imprimée.

Dans un contexte actuel de **transition énergétique**, le marché des fenêtres se porte bien, porté par la rénovation. En effet, la volonté de réduire la consommation énergétique pousse à la rénovation des bâtiments afin de poser des fenêtres dont les déperditions énergétiques sont réduites. En France, ce sont **10,875 millions de fenêtres** qui ont été posées en 2017 [4] (ce chiffre inclut les bâtiments neufs et la rénovation). Le marché de la fenêtre est en hausse dernièrement avec une hausse de 6,8% du marché sur la période 2015-2017 par rapport à 2012-2015 (voir *Figure 6*), d'après une étude de 2018 [4]. Dans ce contexte, l'importance de ces vitrages intelligents, qui permettraient une réduction de la consommation énergétique (en chauffage notamment), est évidente.

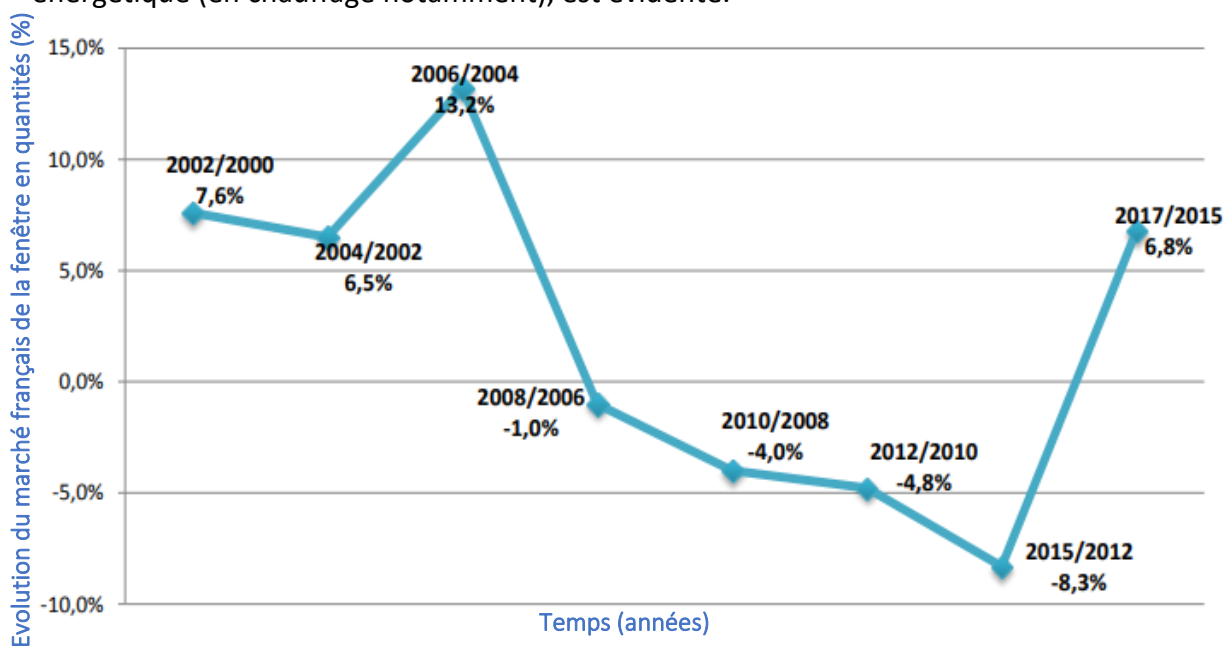


Figure 7. Evolution du marché français de la fenêtre (Source : UFME, Etude du marché de la fenêtre en France en 2017, Septembre 2018)



# III. RAPPORT TECHNIQUE

## 1. La fonctionnalisation des vitrages

---

### 1.1. Historique sur les vitrages

Les fenêtres sont apparues dans l'architecture au XII<sup>e</sup> siècle [1]. Historiquement, elles permettaient la visibilité de l'intérieur vers l'extérieur du bâtiment et vice-versa, ainsi que la protection des usagers. Les fenêtres étaient initialement translucides, composées de parchemin, de toile huilée ou encore de mica [2]. C'est au XIV<sup>e</sup> siècle que les fenêtres sont devenues transparentes grâce à l'utilisation du verre. Les volets intérieurs et extérieurs, permettant de se protéger des intempéries, du vent et du soleil, apparaissent au XVII<sup>e</sup> siècle.

Aujourd'hui, les fenêtres peuvent être fonctionnalisées. L'exemple le plus connu et le plus répandu de fonctionnalisation des fenêtres est le double vitrage, qui permet une meilleure isolation thermique et phonique. Celui-ci a fait l'objet d'un brevet en 1865 et a été industrialisé pour la première fois dans les années 1930. C'est cependant dans les années 1970 que le double vitrage s'est imposé.

Les vitres teintées sont une autre forme de vitres fonctionnalisées. Celles-ci consistent en une vitre recouverte de film polyester multicouche. Elles ont été créées par la NASA [5] afin de permettre la protection des astronautes contre les rayons nocifs du soleil lorsqu'ils sortent de l'atmosphère. Les vitres teintées sont aujourd'hui largement répandues dans les secteurs de l'automobile et du bâtiment. Elles sont utilisées pour développer des vitres anti-éblouissement ou des vitres conférant une meilleure isolation thermique (aussi bien pour garder la chaleur l'hiver que pour empêcher le réchauffement de l'habitacle l'été).

### 1.2. Les enjeux liés à l'utilisation de vitrages intelligentes

#### 1.2.1. *La domotique et l'esthétique*

Le vitrage intelligent présente de réels atouts dans le bâtiment sur un plan esthétique et de confort. Dans un bureau en open-space par exemple, afin de créer un espace dégagé, on peut imaginer des salles de réunion aux cloisons en verre. Lorsque la salle de réunion est occupée, le vitrage devient alors opaque. Cela évite d'encombrer ce vitrage de stores déroulants tout en permettant le déroulement de réunion à l'abri des regards de l'ensemble des collègues et éviter l'effet "bocal à poissons rouges". Ensuite, on peut imaginer des cloisons en verres dans des suites de luxes (hôtels ou villas) séparant la chambre de la salle de bain. Afin d'offrir tout de même de l'intimité à ses occupants, ces cloisons pourraient devenir opaques à souhait.

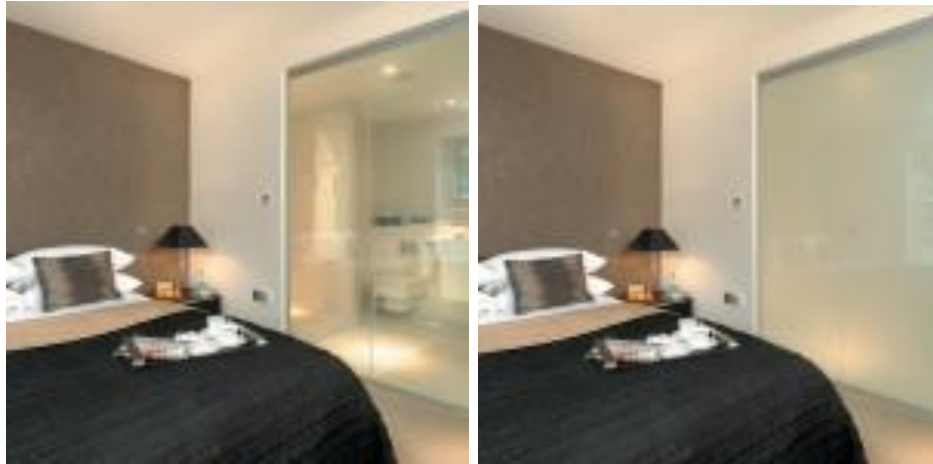


Figure 8. Cloisons en verre intelligent dans une suite d'hôtel (Source : "Peek-a-boo" Effect – LC SmartGlass for Hotel Bathroom Interiors)



Figure 9. Cloison en verre intelligent dans les bureaux de Microsoft à Lisbonne (Source : Smart Glass International)

Une autre possibilité d'utilisation de ces vitrages intelligents concerne le contrôle du rayonnement solaire. Si cela présente des avantages énergétiques (voir 2.2.2. *L'aspect énergétique (développement durable)*), les avantages de cette utilisation concernent également le confort des usagers. En effet, un paradoxe bien connu en été est le désir de conserver la fraîcheur à l'intérieur des habitations sans pour autant vouloir se cloîtrer à l'intérieur. Le vitrage intelligent permet d'offrir une vue dégagée sur l'extérieur tout en maîtrisant le rayonnement solaire.



Figure 10. Façade en vitrage intelligent (Source : Smart Films International, Electrochromic glass)

### 1.2.2. *L'aspect énergétique (développement durable)*

Un des enjeux majeurs lié au développement de vitres intelligentes est lié à l'économie énergétique qu'elles proposent. Dans un contexte de développement durable, il est aisé de comprendre que ce facteur est moteur à leur développement. Les fenêtres sont depuis toujours considérées comme une porte aux déperditions énergétiques. Et si ce n'était plus le cas ?

Le vitrage teinté permet de limiter la consommation énergétique d'un bâtiment. En effet, il offre la possibilité de réguler la quantité de chaleur entrant dans le bâtiment. Ainsi, on peut limiter le recours au chauffage l'hiver en laissant passer la majeure partie du rayonnement solaire et, au contraire, limiter le recours à la climatisation en bloquant la chaleur à l'extérieur des bâtiments l'été. L'économie d'énergie peut également être faite sur l'éclairage : le vitrage intelligent permet de maximiser la transmission lumineuse à l'intérieur du bâtiment et donc de limiter le recours à l'éclairage artificiel qui consomme de l'énergie.

## 1.3. Technologies actuelles de vitrages intelligents

Les techniques actuelles se divisent en trois parties. En effet, il existe trois techniques permettant de fabriquer des vitres intelligentes : la technologie des cristaux liquides (LC), l'électrochromisme et les dispositifs à particules en suspension (SPD).

### 1.3.1. *Technologie à cristaux liquides (LC)*

Le vitrage à cristaux liquides est constitué de deux feuilles de verre entourant un film de cristaux liquides (LC) [6][8]. Lorsque l'on applique un champ électrique, l'orientation des chaînes à cristaux liquides peuvent être modifiées et donc la transmission optique du verre aussi. Lorsqu'aucune tension n'est appliquée, les molécules sont dispersées au hasard et la lumière est diffusée dans de multiples directions, donnant un effet translucide de "blanc opale". Lorsqu'une tension est appliquée, les molécules s'alignent avec le champ électrique et la lumière peut passer sans obstruction.

La consommation d'énergie de la LC est généralement faible - moins de  $5 \text{ W/m}^2$  et le passage de l'opaque à clair est immédiat. En revanche, la technologie LC n'est pas en mesure de réduire très efficacement la transmission du rayonnement solaire. Le verre LC affecte la façon dont la lumière est transférée mais ne modifie pas la quantité de rayonnement, et donc le flux de chaleur à travers le verre, ce qui le rend insatisfaisant pour des raisons d'économie d'énergie. L'utilisation du verre LC est actuellement populaire pour les conceptions architecturales intérieures, telles que les cloisons d'intimité, bien qu'en raison de nombreuses limitations, n'a pas un avenir prévisible comme une façade extérieure du bâtiment.

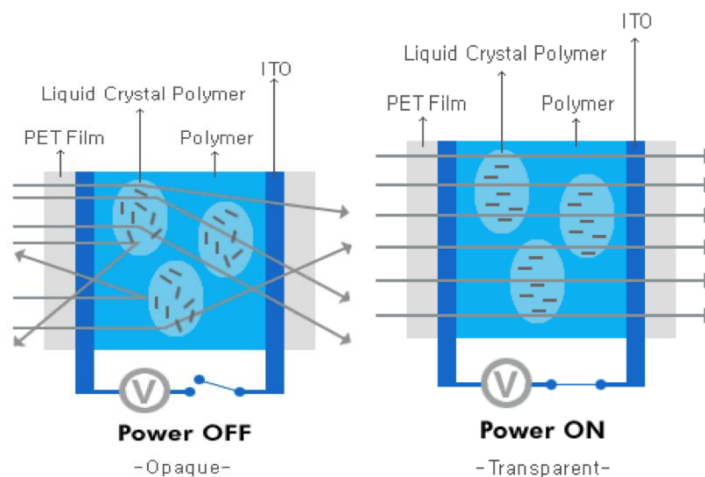


Figure 11. Schéma du fonctionnement de la technologie LC (Source : Smart Glass International. Electronically Switchable Glass Handbook. 2009. 55p)

### 1.3.2. Electrochromisme

Ces dispositifs sont les plus populaires et les plus complexes dans le monde des vitrages connectés. Les appareils se composent d'un film électrochrome solide et mince qui est "pris en sandwich" entre deux couches de verre [6][7]. En appliquant une basse tension à travers la couche mince, la couche électrochrome est activée et change de teinte. C'est avec ce changement de couleur que le verre contrôle ses propriétés de transmission optique. Le verre électrochrome est capable de contrôler le rayonnement solaire en absorbant la chaleur à l'état foncé, mais cela peut conduire à un réchauffement du verre. Un avantage du vitrage électrochrome est que la basse tension n'a besoin d'être appliquée que jusqu'à ce que la coloration désirée soit atteinte et que l'appareil présente une mémoire des couleurs et maintienne la transmission du rayonnement jusqu'à 48 heures.

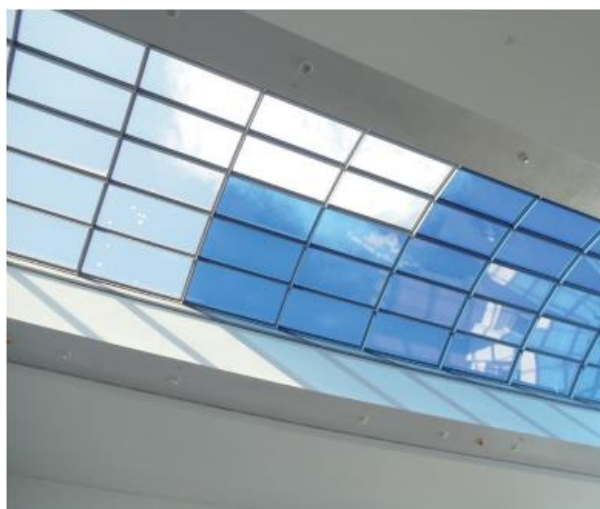


Figure 12. Vitrages électrochromes (Source : Smart Films International, Electrochromic glass)

Le courant électrique peut être activé manuellement ou par des capteurs actifs qui répondent à la lumière extérieure. Ainsi, la technologie de l'électronique imprimée peut intervenir dans la conception de capteur imprimés directement sur la vitre. L'obscurcissement

du verre réduit la transmission solaire et, lorsque la lumière du soleil est faible, le verre peut s'éclaircir, ce qui réduit le besoin d'éclairage artificiel. Le temps nécessaire pour changer de couleur est plus lent que pour les autres technologies et peut prendre jusqu'à 30 minutes pour une fenêtre d'environ 2,4 m<sup>2</sup>. La durabilité des vitrages électrochromes est une question d'actualité, car il faut faire face à un grand nombre de cycles de commutation pour survivre à une durée de vie raisonnable de 10 à 15 ans.

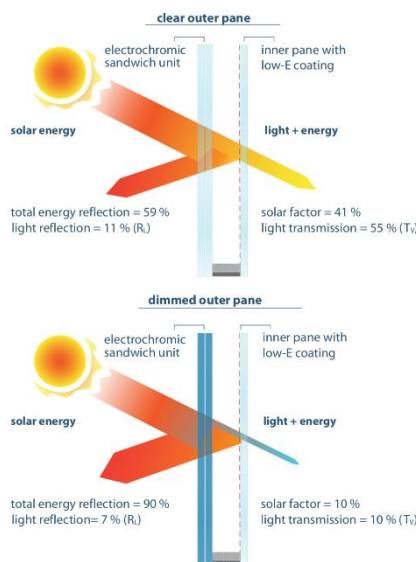


Figure 13. Schéma du fonctionnement de la technologie de l'électrochromisme (Source : Smart film international. Electrochromic glass)

### 1.3.3. Dispositifs à particules en suspension (SPD)

Le SPD (Dispositif à Particules en Suspension) est une technologie à base de film [6][14]. Ce film contient des particules en forme de bâtonnets en suspension dans des milliards de gouttelettes liquides réparties sur le film. Lorsque le film n'a pas de tension appliquée, les particules se trouvent dans des positions aléatoires et bloquent la transmission de la lumière, apparaissant comme une teinte bleu foncé. Lorsqu'une tension est appliquée, les particules peuvent s'aligner et laisser passer la lumière. Le changement de teinte est instantané et l'avantage de cette technologie pour l'utilisateur est que la tension peut être modifiée pour donner un niveau de teinte différent et donc les propriétés de transmission peuvent être modifiées pour s'adapter à tout environnement extérieur particulier.

Les fenêtres SPD offrent un potentiel d'économie d'énergie car l'appareil utilise des particules solides absorbant le rayonnement dans la suspension liquide. Les propriétés optiques précises dépendent de l'épaisseur du film de suspension ainsi que de la concentration des particules. Le rayonnement solaire et la transmission de la lumière visible sont réduits par l'application d'une tension, ce qui réduit le flux de chaleur dans l'environnement interne. Les fenêtres SPD permettent d'avoir une vue dégagée à travers le verre même lorsqu'il est complètement allumé et dans un état de transmission minimale, ce qui présente un avantage visuel par rapport aux autres technologies de vitrage qui rendent le

verre " trouble ". L'inconvénient actuel de cette technologie est son coût. Comme il s'agit d'un développement très récent, la demande n'en est qu'à ses débuts, le titulaire du brevet contrôlant les prix. Avec une commercialisation suffisante et les avantages d'économie d'énergie qui en découlent, le coût diminue à mesure que la demande unitaire augmente.

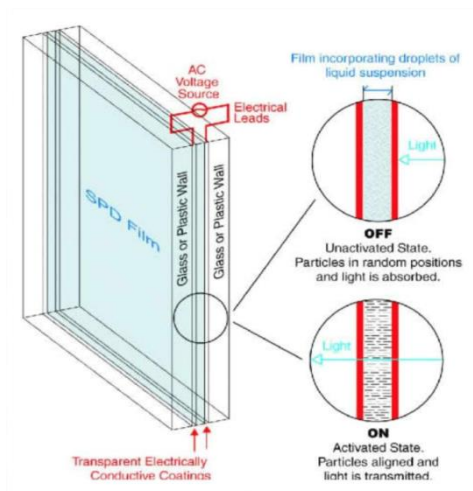


Figure 14. Schéma du fonctionnement de la technologie SPD (Source : Smart Glass International. SPD SmartGlass Overview)

#### 1.3.4. Comparaison des technologies

Le tableau suivant est un récapitulatif des avantages et inconvénients des trois technologies citées ci-dessus.

|   | <i>Avantages</i>  | <i>Inconvénients</i>  |
|---|---|---|
| <i>Vitres à cristaux liquides (LC)</i>              | Faible consommation énergétique<br>Changement de couleur instantané   | Ne permet pas de réduire la quantité de rayonnement solaire transféré           |
| <i>Vitres électrochromes</i>                        | Contrôle du rayonnement solaire   | Changement de couleur lent (jusqu'à 30 min)<br>Durée de vie limitée (10-15 ans) |
| <i>Dispositifs à particules en suspension (SPD)</i> | Contrôle du rayonnement solaire<br>Changement de couleur instantané<br>Vitre complètement transparente même à l'état foncé (pas d'aspect "trouble") | Coût élevé  |

Tableau 1. Comparaison des technologies de vitres intelligentes

Les vitres à cristaux liquides, bien que peu énergivores, ne permettent pas de réduire de la quantité de rayonnement solaire traversant les vitrages mais seulement le flux lumineux. Si les vitres intelligentes venaient à se développer, il est probable que la question environnementale et la volonté de réduire la consommation énergétique domestique seraient des moteurs de ce développement. Or, la technologie à cristaux liquides ne permet pas cela, elle offre simplement un certain confort à l'utilisateur. La technologie de l'électrochromisme, en revanche, permet de contrôler le rayonnement solaire entrant dans les bâtiments et permet des économies d'énergie, ce qui est un atout certain au développement de cette technologie. Cependant, la question de la durée de vie de ces vitrages, qui semble être la plus limitée dans le cas des vitrages électrochrome, pourrait être un frein au développement. Enfin, les dispositifs à particules en suspension semblent être ceux qui présentent le plus d'avantages. Néanmoins, le coût très élevé de cette technologie ralentit son développement.

## 2. L'électronique imprimée

---

L'électronique imprimée est en développement depuis une vingtaine d'années. Elle permet de trouver de nouvelles solutions dans des secteurs comme l'éclairage, le photovoltaïque. Ce sont les procédés conventionnels d'impression qui ont été détournés pour permettre l'impression de ces dispositifs. Les machines conventionnelles sont donc utilisées pour imprimer des encres fonctionnelles (conductrices, résistives, thermochromes, photoluminescentes, etc.).

### 2.1. Définition

L'électronique imprimée représente le domaine d'impression de composants électroniques tels que des résistances, des circuits, des diodes ou des cellules. Ce secteur d'impression s'appuie sur 3 principaux éléments : le procédé d'impression, le substrat et l'encre.

A l'aide de cette technologie on peut désormais créer des objets tels que des écrans, des batteries ou des antennes RFID.

Le procédé de fabrication traditionnel d'électronique reste d'une qualité supérieure pour les travaux de microélectronique. A l'inverse, pour des travaux simples et en grande quantité, l'impression d'électronique devient concurrentielle. En effet, ce procédé est moins coûteux et permet de créer rapidement et en grande série le même produit. C'est pourquoi il est intéressant d'utiliser cette technologie pour les vitres connectées. En effet, les atouts de l'électronique imprimée sont les suivants :

- Une production possible sur des grandes surfaces
- Une productivité élevée induisant un coût de production plus faible que les procédés conventionnels
- Possibilité d'imprimer des composants électroniques souples

La flexibilité des composants électroniques n'est pas un avantage dans le cas des vitrages intelligents puisque le support utilisé est rigide. En revanche, la capacité à faire face à de grandes surfaces et la forte productivité de la méthode sont de réels atouts pour le développement des vitrages intelligents. Le marché des vitres est aujourd'hui très important et concurrentiel. La combinaison de ces deux marchés que sont les vitrages et l'électronique imprimée semble donc judicieuse.

## 2.2. Les procédés d'impressions

Le procédé d'impression utilisé dans ce secteur est un élément important [20]. Il est nécessaire de choisir le procédé le plus adapté pour subvenir aux contraintes liées à l'électronique imprimée. Le substrat utilisé se doit de respecter certains critères permettant l'impression électronique. Par exemple, le papier ne doit pas être trop poreux pour éviter les lignes discontinues, l'énergie de surface doit être suffisante pour qu'il y ait adhésion entre l'encre et le substrat.

De nombreux procédés sont utilisés pour les impressions électroniques avec chacun différentes caractéristiques qui induisent certains avantages et inconvénients. Ces différentes caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant [13] [19] [26] :



|                                | Offset  | Sérigraphie  | Jet d'encre   | Flexographie                                       | Héliogravure  |
|--------------------------------|---|--|---|--|---|
| Viscosité (Pa.s)               | 10-100  | 1-100  | 0,001-0,03  | 0,05-0,5   | 0,02-0,2  |
| Épaisseur d'encre déposée (µm) | 1-2   | 20-100   | 0,5-1   | 6-8  | 8-12  |
| Résolution (µm)                | 15  | 100  | 20  | 40   | 15  |
| Avantages                      | Impression Recto-verso possible<br>Haute résolution           | Bonne répétitivité<br>Épaisseur importante<br>Différents supports<br>Faible pression | Petite série<br>Précis<br>Sans contact<br>Petit dépôt | Résolution<br>Haut débit                           | Lignes très étroites  |
| Inconvénients                  | Présence d'eau  | Lent<br>Faible quantité et résolution<br>Épaisseur de ligne limité                   | Effet coffee ring<br>Gouttes individuelles possibles  | Engraissement du point<br>Utilisation des solvants | Pression<br>Stries possibles<br>Points manquants possibles  |
| Applications                   | Capacité<br>Circulateur à radiofréquence<br>Circuits intégrés | Capteurs<br>Transistors organiques à couche mince<br>Circuits électroniques          | RFID<br>OLED<br>Transistors                           | RFID<br>Capteurs<br>Lignes conductrices            | OLED<br>Pistes conductrices<br>Étiquettes de radiofréquence |

Tableau 2. Tableau de comparaison des différents procédés utilisés en électronique imprimée

Le verre étant un support rigide et cassant, tous les procédés ne sont pas adaptés à l'impression sur ce support. L'héliogravure ne sera vraisemblablement pas employée pour cette application du fait de la pression élevée à l'impression. La flexographie met en jeu des solvants ce qui peut être problématique dans le cas de l'impression de composants électroniques. De plus, le phénomène d'élargissement du point peut s'avérer problématique pour l'impression de fines lignes conductrices. En offset, bien que la résolution soit très bonne (ce qui est souhaitable en électronique imprimée pour imprimer de fines lignes), la présence d'eau n'est pas souhaitable pour de l'électronique imprimée. L'offset waterless (sans eau) serait en revanche une alternative à étudier davantage. La sérigraphie et le jet d'encre semblent être les procédés les plus adaptés à l'impression sur verre. La sérigraphie n'impose que peu de pression au support et le jet d'encre est une technique d'impression sans contact. Il faudra néanmoins adresser les problématiques d'adhésion au support. En jet d'encre, le « coffee ring effect » est également un phénomène à maîtriser afin que les lignes imprimées soient uniformes.

### 2.3. Les encres

Les encres utilisées pour l'électronique imprimée se divisent en deux grandes parties [13] : les encres aux propriétés électriques (nanoparticules d'argent, polymères, ...) et les encres contenant des matériaux fonctionnels (encre X-chromique, photochromique, ...).

#### Les encres pour l'électronique imprimée :

Elles se composent des encres conductrices, semi-conductrices et isolantes (diélectriques). On retrouve des encres conductrices qui contiennent des nanoparticules de métaux ou d'alliages. Celles-ci sont donc très conductrices. On trouve des métaux tels que l'argent, le nickel ou le zinc. Tous ces différents matériaux possèdent une conductivité comprise entre  $10 \cdot 10^6$  et  $63 \cdot 10^6$  S/m. Aujourd'hui on retrouve des encres aussi conductrices mais plus chères, ce sont les encres composées de nanotubes de carbone. A l'inverse des métaux, ces nanoparticules ont l'avantages d'être souples et ainsi faciliter les impressions sur des supports flexible. De plus, certains défauts dans la création de ces nanotubes peuvent permettent de fonctionnaliser ces encres.

D'autres encres semi-conductrices sont constituées de polymères tels que le polyéthylène ou le polypropylène. Ces composants possèdent plusieurs avantages :

- Leur masse spécifique est faible (environ  $1000 \text{ kg/m}^3$  contre  $10\ 000$  à  $20\ 000 \text{ kg/m}^3$  pour les métaux)
- Leur prix est aussi beaucoup plus faible
- Ils sont plus flexibles ce qui est intéressant pour des impressions sur des supports souples

Mais ils présentent aussi certains inconvénients :

- Ils possèdent aussi une forte résistivité  $10^{20}$  contre  $10^{-9}$   $\Omega.m$  ce qui leur confère ainsi un comportement beaucoup moins conducteur
- Ils se dégradent plus rapidement sous l'effet d'UV, de température ou d'humidité élevées

D'autres polymères sont aussi utilisés pour obtenir des transistors : les plus utilisés sont le polythiophène (PEDOT-PSS), le polyaniline (PANI) ou le polypyrrole (PP). Ces composants ont l'avantage d'être organiques.

Aujourd'hui, on peut même utiliser des nanocristaux ou des nano-fibrilles de cellulose (non conducteurs) pour formuler des encres semi-conductrices. On retrouve aussi une famille d'oxydes qui peuvent devenir conducteurs en présence d'excès d'électrons. Ces oxydes ont la propriété d'être transparents ce sont les TCO : Transparent Oxyde Conductor. Ils peuvent être utilisés dans des applications comme le photovoltaïque.

#### Les encres fonctionnelles :

Ces encres possèdent des caractéristiques différentes qui leur confèrent des fonctionnalités autres que la conductivité. On retrouve des encres sensibles à la lumière (photoluminescente, photochromique...), à certains gaz ou à la pression.

Dans le cadre des vitres fonctionnalisées, des encres fonctionnelles sont aujourd'hui beaucoup utilisées pour des vitres qui changent de teinte selon l'ensoleillement par exemple. On trouve aussi des encres électroniques servant à créer des écrans LCD imprimés. Enfin, des essais sont réalisés avec des TCO pour garder les propriétés transparentes des vitres tout en ajoutant les caractéristiques conductrices recherchées.

| <i>Encres</i>                                | <i>Avantages</i>   | <i>Inconvénients</i>                     |
|--|--|--|
| <i>Métaux</i>                                | Bonne conductivité   | Prix élevé                               |
| <i>Polymères</i>                             | Prix faible<br>Flexibilité<br>Rapidité de production<br>Faible masse spécifique                              | Faible conductivité                      |
| <i>TCO</i>                                   | Transparent<br>Bonne conductivité  | Prix très élevé                          |
| <i>Nano-fibrilles/cristaux de celluloses</i> | Biosourcés<br>Petite taille  | Faible conductivité                      |
| <i>Nanotubes de carbones</i>                 | Synthétisable<br>Taille nanométrique<br>Fonctionnalisation possible<br>Module d'Young élevé<br>Pas de recuit | Prix très élevé<br>Difficile à disperser |

Tableau 3. Tableau récapitulatif des différents matériaux utilisés en électronique imprimée

## 2.4. Les substrats

Le choix du substrat est un paramètre déterminant pour la qualité de l'impression. En impression conventionnelle, la gamme des substrats utilisables est large : on trouve des polymères, des métaux, de la céramique, du verre, du carton et bien sûr du papier. Ces supports peuvent être sous forme de bobines (pour les supports flexibles) ou en feuilles. En électronique imprimée, les caractéristiques requises pour ces substrats sont différentes de celles de l'impression conventionnelle [13] :

- Résistance à la température pour le recuit
- Rugosité et la porosité, pour éviter les discontinuités dans les lignes
- Stabilité dimensionnelle
- Force mécanique

La majorité des substrats polymères utilisés sont constitués de PET (polyéthylène téréphtalate), de PEN (polyéthylène naphthalate) ou de polyimide [13]. Dans le cas de la fonctionnalisation des vitrages, des films en polymères imprimés à coller sur les vitres sont envisageables.

Les supports papiers ont plus récemment été introduits en électronique imprimée [18][26]. Le papier non traité est en revanche trop poreux, trop rugueux, avec une faible stabilité dimensionnelle ce qui va provoquer des variations d'épaisseur et de largeur, voire des discontinuités des lignes imprimées. Aujourd'hui, on est capables de traiter des papiers pour améliorer leurs propriétés et ainsi éviter les défauts cités. Il est aujourd'hui considéré comme un substrat low-cost et flexible pour l'électronique imprimée. Cependant, il est difficile d'imaginer intégrer ce support à la fonctionnalisation de vitrages du fait de son opacité et de sa sensibilité à l'humidité.

Dans le cadre de la fonctionnalisation des vitrages, les substrats utilisés vont être essentiellement des supports en verre. Il s'agit donc d'identifier les contraintes liées à l'impression sur ce support. Le verre est un support rigide. Il n'est donc pas compatible avec la plupart des procédés d'impression, où le support doit être flexible pour venir au contact des rouleaux d'impression (flexographie, offset, héliogravure). De plus, la pression exercée par certains procédés peut endommager ce support fragile. Un procédé sans contact comme le jet d'encre est souhaitable. La sérigraphie à plat peut également s'avérer efficace. Néanmoins, ces deux procédés ne sont pas parmi les plus rapides donc la question de la productivité se pose. Le verre présente également un obstacle majeur à l'impression qui est l'adhésion de l'encre au support. Des traitements de surfaces (Corona, flash photonique, etc.) seront indispensables pour améliorer l'affinité encre/verre.

Le tableau suivant résume les avantages et les inconvénients des trois supports d'impression cités précédemment par rapport à l'électronique imprimée dans le cadre de la fonctionnalisation des vitrages.

| <i>Substrats</i> | <i>Avantages</i>   | <i>Inconvénients</i>  |
|------------------|--|---|
| <i>Polymères</i> | Flexibilité<br>Résistance aux solvants et à l'humidité<br>Stabilité dimensionnelle | Non recyclable  |
| <i>Papier</i>    | Biosourcés<br>Fabriqué à partir de matériaux recyclés<br>Faible coût               | Résolution moins bonnes<br>Traitements supplémentaires<br>Anisotropie<br>Instabilité dimensionnelle |
| <i>Verre</i>     | Transparent<br>Stabilité dimensionnelle<br>Résistance aux hautes températures      | Rigidité<br>Adhésion de l'encre   |

Tableau 4. Avantages et inconvénients des différents substrats pour la fonctionnalisation de vitrages

## 2.5. Les applications

Les applications de l'électronique imprimée sont aujourd'hui très nombreuses dans l'industrie, même si cela reste une très petite part de l'impression et de la fabrication des composants électroniques. On peut distinguer deux familles de produits fabriqués en électronique imprimée : l'intelligence imprimée et le management de l'énergie.

L'intelligence imprimée regroupe [19] :

- Les circuits électriques
- L'identification, la sécurité (antennes RFID)
- L'affichage (OLED)
- L'éclairage
- Les capteurs

Le management de l'énergie concerne les batteries, les cellules photovoltaïques et d'énergie.

### 2.5.1. Les capteurs

Une grande partie des impressions électroniques sont donc les capteurs. Il existe différentes sortes de capteurs [12] :

- De pression : ils enregistrent la pression mesurée, la convertissent en un signal électrique pour ensuite la restituer en un signal de commutation.
- Capacitifs : ils détectent les changements de capacité lors des interactions avec le détecteur.
- Piézorésistifs : ils transforment l'énergie mécanique en électrique.
- Biocapteurs : ils interagissent avec un élément biologique et convertissent la réponse biologique en signal électrique [15]. Exemple : biocapteur de glucose dans le sang.
- Optiques : ils détectent des variations d'intensité lumineuse.

- De température : ils détectent des variations de température.
- De gaz : ils détectent la présence de certains gaz.

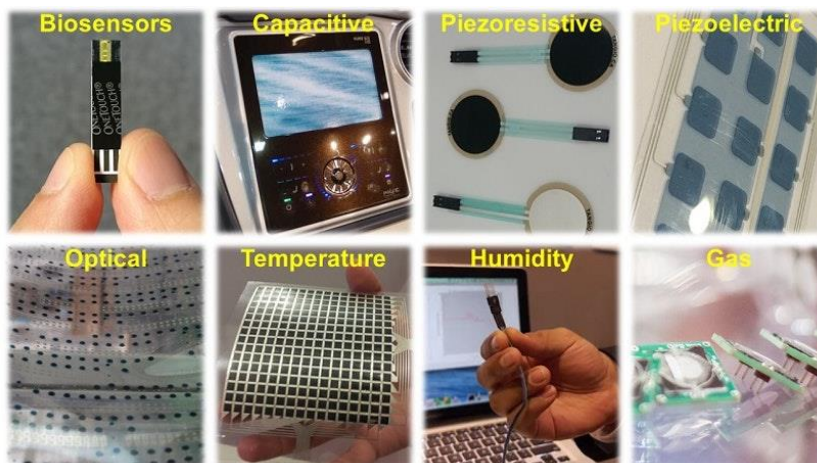


Figure 15. Différents types de capteurs (Source : idtechex.com)

Dans le cadre de la fonctionnalisation des vitrages, certains types de capteurs seront plus utiles que d'autres. Des capteurs optiques peuvent mesurer la luminosité extérieure et ainsi faire varier la teinte des vitres selon le signal enregistré. Cela permet de créer des vitres dont la teinte varie automatiquement en fonction de la luminosité. Sur le même principe, des capteurs de température peuvent permettre de faire varier la teinte selon la température intérieure ou extérieure. Par exemple, lorsqu'il fait très chaud dehors, la vitre peut s'assombrir grâce à l'indication d'un capteur de température, ce qui permettrait de limiter le réchauffement de la pièce et donc limiter le recours à la climatisation. A l'inverse, des capteurs de pression peuvent permettre de créer des vitres dont la teinte peut être changée manuellement par l'utilisateur par le biais d'une interface composée de boutons sensibles à la pression, directement imprimée sur la vitre.

### 2.5.2. Les OLEDs

Les OLEDs ou diodes électroluminescentes organiques servent de technologie d'affichage reposant sur le phénomène d'électroluminescence. Ces diodes peuvent être imprimées sur des supports rigides ou flexibles.



Figure 16. OLED imprimées sur un support flexible (source : lejournal.cnrs.fr)

La technologie OLED est basée sur le principe de diodes superposées. L'alimentation de ces diodes par un courant électrique va provoquer une émission de lumière. Chacune des

diodes est constituée d'un semi-conducteur organique entouré par une cathode métallique (charge positive) et une anode transparente (charge négative). Le tout est assemblé sur un support en verre ou en plastique. Le schéma ci-dessous résume le fonctionnement :

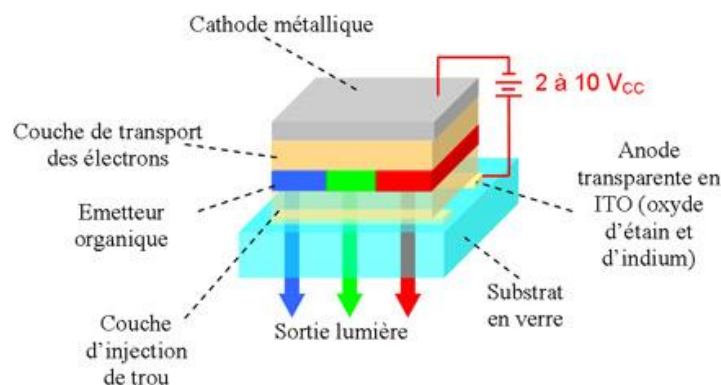


Figure 17. Schéma du fonctionnement de l'OLED (source : ecranflexible.com)

### 2.5.3. Le RFID

Le RFID (Radio Frequency Identification) est basé sur l'émission d'un champ électromagnétique par un "lecteur" ou "élément fixe" qui est reçu par l'antenne d'une ou plusieurs étiquettes. Ce champ électromagnétique ou électrique sert de vecteur pour l'information entre l'étiquette et le support ainsi que de support d'énergie d'activation de ces étiquettes.

Il existe plusieurs modes de fonctionnement pour ces étiquettes RFID :

- Lecture seule : Il est uniquement possible de lire les informations de l'étiquette. Exemple : étiquette de produit en supermarché.
- Lectures et écritures multiples : Réutilisation et mise à jour des informations possibles. Exemple : suivi sur les chaînes de production des produits.
- Lectures et/ou écritures protégées : Certaines parties ou toutes les informations peuvent être protégées ou non inscriptible.
- Lectures et/ou écritures sécurisées, cryptées : utilisé dans le cadre de sécurité et d'authentification.



Figure 18. Antenne RFID

Voici quelques exemples d'applications de ces antennes RFID :

- Dans les poubelles pour identifier des manquements au recyclage et réduire le volume d'ordures.
- Sur les valises pour améliorer le processus d'acheminement dans les aéroports.
- Péage électronique permettant de simplifier le paiement et ainsi d'éviter les embouteillages.
- Dans les arbres pour effectuer leur suivi (exemple à la mairie de Paris).

#### 2.5.4. *Les batteries*

Des batteries en électronique imprimée ont été développées en laboratoire. Elles permettent de répondre aux contraintes principales des pile-boutons : la taille et la flexibilité. Néanmoins leur coût reste toujours très élevé et leur performance trop faible pour être commercialisées.

##### Le principe de fabrication [25] :

La batterie est composée de plusieurs couches. On trouve deux couches isolantes qui recouvrent une couche électrolyte centrale. Les électrodes sont donc formées par les deux faces de la feuille.

##### Les différentes technologies déjà développées [26] :

- SoftBattery par Enfucell (Finlande) : une pile de la taille d'un carré de 5 cm et de 0,4 mm d'épaisseur. Elle délivre une tension de 1,5 ou 3 volts.
- L'institut Fraunhofer (Allemagne) en collaboration avec l'université de Chemnitz et Menippos ont développé une pile. Elle pèse moins d'un gramme et son épaisseur est inférieure à 1 millimètre. Elle délivre une tension de 1,5 volts. Elle est imprimée en sérigraphie. Son principal inconvénient est son usure rapide.
- Une batterie en papier par l'université de Standford (USA) : une encre contenant de nanotubes de carbone est déposée sur du papier. Cela confère au papier une grande conductivité avec une résistance aussi faible. Ses avantages sont le coût qui est plus faible et le nombre de recharges possibles (40 000).
- Une pile en papier cartonné par Sony : l'électricité de la pile est fournie par la décomposition des molécules de sucre stockées dans le carton. Ces piles ne fournissent qu'une faible puissance, elles ne sont utilisées que pour de petites applications comme les cartes de vœux ou des petits ventilateurs.



## 3. L'électronique imprimée dans la fonctionnalisation des vitrages

---

### 3.1. Cahier des charges et problèmes techniques

Le cahier des charges du vitrage intelligent contient plusieurs critères indiquant que l'application de l'électronique imprimée à la fonctionnalisation des vitrages est un choix judicieux :

- Grandes surfaces
- Productivité élevée
- Bas coût
- Imprimabilité sur du verre

Toutefois, d'autres contraintes imposées par le cahier des charges du vitrage intelligent sont un réel défi pour l'impression :

- Transparence du film d'encre
- Très grande solidité lumière de l'encre
- Durée de vie élevée (au moins 15 ans)

Si ces contraintes semblent effectivement être des entraves au développement de l'électronique imprimée dans ce secteur, elles ne rendent pas pour autant ce développement impossible. L'ITO (Indium Tin Oxide, oxyde d'indium dopé à l'étain) appartient à la famille des Oxydes Conducteurs Transparents (TCO) et est déjà utilisé dans la fabrication de cellules photovoltaïques. Son utilisation pour le vitrage intelligent est donc envisageable. La transparence peut également être acquise en ayant recours à l'impression de traits très fins.

### 3.2. Utilisation actuelle de l'électronique imprimée dans la fonctionnalisation des vitrages

Il apparaît qu'il n'y ait aujourd'hui aucune application de l'électronique imprimée à la fonctionnalisation des vitrages. Les couches conductrices des vitrages intelligents sur le marché aujourd'hui (vitrages électrochromes, à cristaux liquides ou à particules en suspension) sont vraisemblablement appliquées par une méthode d'enduction et non d'impression. Cela est en effet judicieux puisque ces technologies ne requièrent pas de formation de motifs spécifiques, la couche conductrice est simplement un aplat uniforme.

### 3.3. Perspectives d'utilisation de l'électronique imprimée dans la fonctionnalisation des vitrages

Il est difficile d'imaginer que l'électronique imprimée s'imposera comme technique de fabrication majeure dans les vitrages à teinte variable. En revanche, il est probable que les vitrages intelligents de demain soient multi-fonctionnalisés.

On peut imaginer des vitrages à teinte variable également capables d'afficher du contenu par exemple. Panasonic a présenté, lors de l'IFA 2016, un prototype de sa dalle OLED transparente [27]. Il s'agit en fait d'une dalle en verre recouverte de diodes OLED reliées par des fils très fins. On parle en réalité de semi-transparence car fils et diodes ne sont pas invisible, mais ne sont distinguables que lorsque l'on regarde l'écran de très près. La dalle est transparente à 45% et une résolution de 1080p.

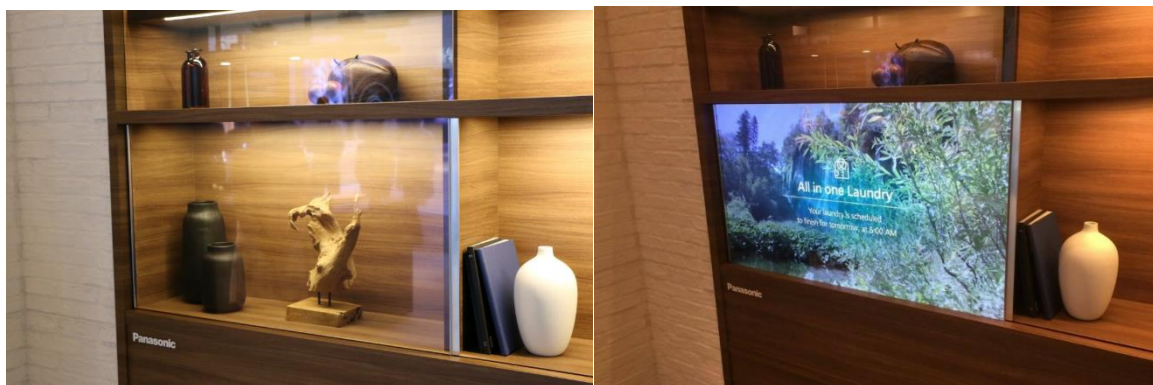


Figure 19. La dalle OLED de Panasonic (source - [www.lesnumeriques.com](http://www.lesnumeriques.com))

Le produit devrait être disponible en 2019 à un prix avoisinant 20 000€. La taille de cette dalle n'est que de 55 pouces. Pour envisager appliquer cette technologie à des fenêtres, il faudrait être en mesure de l'étendre à des surfaces plus grandes. Le coût de ce produit serait également un frein majeur à son application aux fenêtres intelligentes, puisque, en supposant que le coût est proportionnel à la surface, on atteindrait facilement 80 000€ pour une fenêtre de taille standard ! Toutefois, si cette technologie venait à s'appliquer aux fenêtres, il serait envisageable d'utiliser l'électronique imprimée dans le processus de fabrication. Panasonic ne communique pas sur le processus de fabrication de ce produit, pour des raisons assez évidentes. Le produit présenté n'était qu'un prototype, il est fort probable qu'il ait été fabriqué à l'aide de procédés conventionnels sous vide de microélectronique. Si le produit venait à se développer et s'industrialiser, l'électronique imprimée permettrait de réduire considérablement son coût. Quoiqu'il en soit, il s'agit là de pistes de recherches prometteuses. Il a déjà été démontré que les OLED peuvent être imprimées sur du verre par un procédé d'héliogravure [28]

Le Centre Technique du Papier (CTP) a breveté un papier peint baptisé Métapapier qui se comporte comme un filtre aux ondes Wifi (2,4 et 5,5 GHz) et GSM (0,9, 1,8 et 2,1 GHz). Celui-ci permet par exemple de sécuriser un réseau Wifi domestique en le protégeant des intrusions de l'extérieur, ou de créer des pièces dans lesquelles les ondes ne pénètrent pas pour des personnes souffrant d'électrosensibilité. Ce papier peint comporte des motifs spécifiques imprimés à l'aide d'une encre à particules d'argent. Il s'agit là d'une autre fonctionnalisation des vitres qui peut être envisagée, puisque ces motifs peuvent parfaitement être imprimés sur du verre. Le problème de la transparence se pose puisque l'encre aux particules d'argent n'est pas transparente. Il est cependant envisageable d'imprimer ces motifs avec un trait suffisamment fin pour qu'ils soient à peine visibles.



Figure 20. Le Métapapier du CTP (source - [www.futura-sciences.com](http://www.futura-sciences.com))

## IV. RAPPORT ECONOMIQUE

### 1. Marché du vitrage

---

#### 1.1. Contexte législatif et réglementaire

Au sein de l'Union Européenne, la législation va dans le sens d'un objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre [39]. En effet, d'ici 2050, l'Union Européenne s'est fixé des objectifs concernant l'énergie et le climat dans l'optique d'une baisse de l'empreinte carbone. Pour cela, elle s'est fixé 3 objectifs :

- ✓ Réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 80% pour 2050 par rapport au chiffre de 1990
- ✓ Tous les secteurs, notamment le secteur de la construction, doivent contribuer à la réussite de cet objectif
- ✓ Améliorer l'efficacité énergétique de 57%

Ce contexte s'étend naturellement au secteur du vitrage. Dans la Communauté Européenne, toute fenêtre vendue le marquage CE [23] est obligatoire. La norme applicable aux portes et fenêtre est la norme NF EN 14351-1. Celle-ci est obligatoire pour l'obtention du marquage CE, et, de fait, la conformité à cette norme est obligatoire pour toute vente de fenêtre.

D'autres réglementations s'appliquent également [24]. En France, tout bâtiment neuf construit après le 1er janvier 2013 doit répondre à la Réglementation Thermique de 2012

(RT2012). Cette réglementation répond à 3 exigences. La première est le besoin bioclimatique qui caractérise le besoin en énergie chauffage, refroidissement et éclairage du bâtiment. La seconde est la consommation d'énergie dite primaire liée au chauffage, au refroidissement, à l'éclairage et à la production d'eau chaude. Enfin, la troisième est le confort d'été dont l'objectif est de limiter au maximum le recours à la climatisation. Ensuite, d'autres facteurs comme la sécurité des personnes, les risques incendie et sismique, l'acoustique et les polluants volatils.

Lors de la vente d'une fenêtre, le distributeur fournit une déclaration de performances. Celle-ci reprend les différents critères cités précédemment qui sont soumis à la réglementation. Un autre critère qui est donné dans cette déclaration de performance qu'il est intéressant de prendre en compte dans le cadre de ce rapport est le facteur de transmission lumineuse, défini par le coefficient TLw. Il s'agit d'un nombre sans unité qui définit la capacité d'une fenêtre à transmettre le rayonnement lumineux d'origine solaire à l'intérieur du bâtiment. Plus le coefficient TLw est élevé, plus la quantité de lumière qui traverse la fenêtre est élevée.

Un autre paramètre est à prendre en compte dans la réglementation du vitrage : la performance de déperdition thermique [23]. En effet, le seuil de perte de chaleur a été fixé par des lois pour limiter la consommation d'énergie des bâtiments. Un coefficient de déperdition thermique  $U_w$  permet de quantifier ces déperditions. Ce dernier doit être inférieur à  $2,3 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  pour les fenêtres. Il peut monter jusqu'à  $2.6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  pour les portes coulissantes vitrées. Le calcul de ce coefficient prend en compte les coefficients de transmission thermique et les aires de chaque partie d'une vitre, sachant qu'une vitre est composée de 4 parties (voir figure ci-dessous) : le châssis (1), le ou les vitrages (2), le ou les panneaux (3) et la ou les grilles de ventilation (4) [38].



Figure 21 : Les différentes parties d'une fenêtre (source - [www.energieplus-lesite.be](http://www.energieplus-lesite.be))

Cette nouvelle réglementation peut poser certains problèmes lors de la conception d'une fenêtre mais les fenêtres intelligentes chauffantes pourraient être une bonne solution.

## 1.2. Impact de la législation sur le marché du vitrage en termes de performances énergétiques

Le marché du vitrage évolue au fil des années. En effet, la volonté de réduire les déperditions énergétiques liées aux fenêtres est bien réelle et cela est appuyé par la réglementation. Le graphe suivant, réalisé par l'Union des Fabricants de Menuiserie (UFME) en 2018, décrit l'évolution de la vente des fenêtres en France selon leur coefficient de déperdition thermique  $U_w$ .

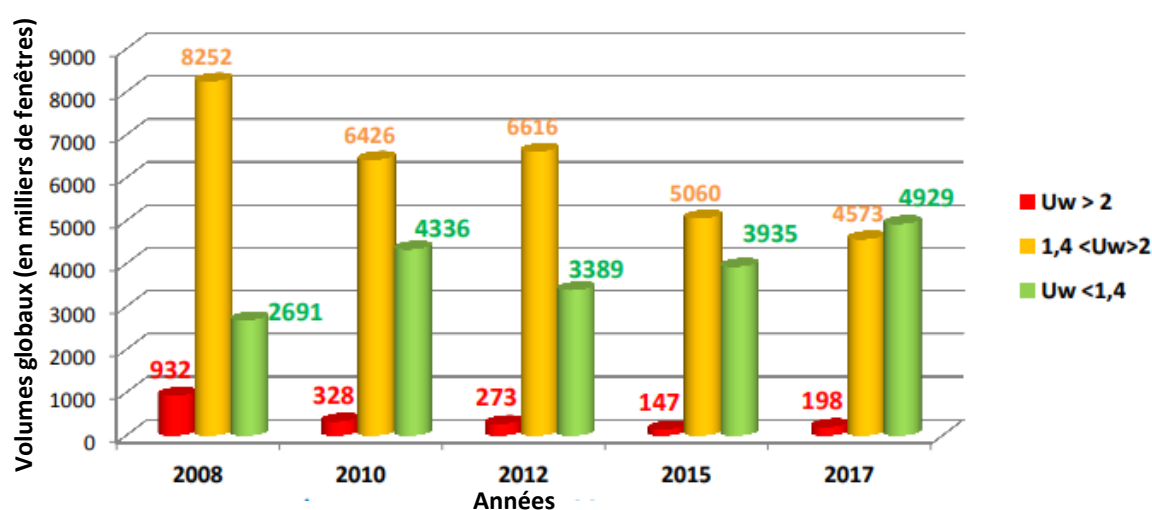


Figure 22 : Répartition des ventes des fenêtres selon leur coefficient de déperdition thermique (Source : UFME, 2018)

Comme indiqué précédemment, les concepteurs de vitrages privilégient de plus en plus les fenêtres aux faibles coefficients de déperdition thermique [3]. En effet, le volume des ventes de fenêtres ayant un faible coefficient de déperdition thermique ( $<1,4$ ) est passé d'environ 2 700 000 en 2008 à presque 5 000 000 en 2017.

Depuis 2007, la réglementation française interdit les fenêtres dont le coefficient  $U_w$  est supérieur à 2. C'est pourquoi le nombre de ces fenêtres est en décroissance depuis 2008.

De plus, on constate que les ventes de fenêtres ayant un faible coefficient  $U_w$  avait diminué entre 2010 et 2012. Or, la Réglementation Thermique de 2012 (RT2012) prône une réduction des déperditions énergétiques des bâtiments et donc prône les fenêtres aux faibles coefficients  $U_w$ . Cela explique la hausse des ventes de fenêtres au coefficient  $U_w$  inférieur à 1,4 depuis 2012. La RT2012 interdit également les fenêtres au coefficient  $U_w$  supérieur à 2,3 [23]. C'est pourquoi les fenêtres au coefficient  $U_w$  supérieur à 2 tendent à disparaître.

Comme spécifié précédemment, 10,875 millions de fenêtres ont été vendues en France en 2017 [3]. Un des intérêts de l'électronique imprimée est de faire face à de grandes surfaces d'impression. Afin de se rendre compte du potentiel du marché du vitrage et de ce que l'électronique imprimée pourrait y apporter, il serait intéressant d'obtenir des données sur la surface vitrée totale en France. Ces données étant difficilement trouvables, il s'agit de les estimer. Deux méthodes ont été utilisées pour effectuer ce calcul.

### Méthode 1 :

Les dimensions standards des différents types de fenêtres sont [34] :

- 0,750 x 0,600 m pour une fenêtre standard à un vantail
- 1,250 x 1,000 m pour une fenêtre standard à deux vantaux
- 2,150 x 0,700 m pour une porte-fenêtre standard
- 2,150 x 1,100 m pour une porte-fenêtre standard à deux vantaux
- 2,150 x 2,100 m pour des baies coulissantes

Ces dimensions permettent de calculer la surface de chaque type de fenêtre ainsi que la surface moyenne d'une fenêtre quel que soit le type. Connaissant le nombre de fenêtre posées en 2017, il est possible de calculer la surface vitrée totale en France. Cette méthode permet d'estimer que la surface vitrée moyenne en France en 2017 s'élève à **2,19.10<sup>7</sup> m<sup>2</sup>**.

|  | Longueur (m) | Largeur (m)           | Surface (m <sup>2</sup> ) |
|--|--------------|-----------------------|---------------------------|
| <i>Fenêtre standard à un vantail</i>         | 0,75         | 0,60                  | 0,45                      |
| <i>Fenêtre standard à deux vantaux</i>       | 1,25         | 1,00                  | 1,25                      |
| <i>Porte-fenêtre standard à un vantail</i>   | 2,15         | 0,70                  | 1,505                     |
| <i>Porte-fenêtre standard à deux vantaux</i> | 2,15         | 1,10                  | 2,365                     |
| <i>Baies coulissantes</i>                    | 2,15         | 2,10                  | 4,515                     |
|  |              | <b><u>Moyenne</u></b> | <b>2,017</b>              |

Tableau 5 : Dimensions standards des fenêtres en France permettant de calculer la surface moyenne

|   |                      |
|---|----------------------|
| <i>Nb fenêtres en France (en millions)</i>              | 10,875               |
| <i>Surface vitrée moyenne en France (m<sup>2</sup>)</i> | 2,19.10 <sup>7</sup> |

Tableau 6 : Nombre de fenêtres en France permettant de calculer la surface vitrée moyenne

Bien entendu, il ne s'agit là que d'une estimation. La proportion de chaque type de fenêtre n'a pas été prise en compte, l'hypothèse a été faite que tous ces types de fenêtre sont vendus à part égale. Il est aussi possible d'imaginer que ce chiffre peut être tiré vers le haut

par la surface vitrée des gratte-ciels qui présentent une proportion de surface vitrée largement supérieure à celle des maisons classiques.

### Méthode 2 :

La surface moyenne habitée par un français en 2015 est de 45,1 m<sup>2</sup> dans une maison et 32,4 m<sup>2</sup> dans un appartement [35]. Il y a 67,19 millions d'habitants en France en 2018. En considérant qu'un français sur deux vit dans une maison et l'autre moitié en appartement, il est possible de calculer la surface totale habitée par les français. Une loi de la RT2012 préconise que toutes les maisons construites après le 1er janvier 2013 doivent présenter une surface vitrée d'au moins 1/6e (environ 17%) de la surface habitable totale. Considérant ce chiffre, on peut estimer la surface vitrée minimale totale en France. Cette méthode nous donne un surface vitrée minimale de **4,34.10<sup>8</sup> m<sup>2</sup>**.

|   |                      |
|---|----------------------|
| <i>Surface moyenne par habitant dans une maison (m<sup>2</sup>)</i>     | 45,1                 |
| <i>Surface moyenne par habitant dans un appartement (m<sup>2</sup>)</i> | 32,4                 |
| <i>Nb d'habitants en France en 2018 (en millions)</i>                   | 67,19                |
| <i>Surface habitée en France (m<sup>2</sup>)</i>                        | 2,6.10 <sup>9</sup>  |
| <i>Surface vitrée minimale (loi RT2012) (%)</i>                         | 17                   |
| <i>Surface vitrée minimale moyenne en France (m<sup>2</sup>)</i>        | 4,43.10 <sup>8</sup> |

*Tableau 7 : Surface moyenne par habitant permettant de calculer la surface vitrée minimale moyenne en France, selon les contraintes de la RT2012*

Cette méthode ne prend pas en compte la proportion de personnes habitant dans des maisons ou des appartements, ce qui peut fausser le résultat. De plus, seules les maisons construites après le 1er janvier 2013 sont soumises à cette loi, ce qui peut faire que le résultat est surestimé. En revanche, les surfaces habitées par habitant sont des chiffres de 2015. La tendance est à la hausse pour ce chiffre, ce qui laisse penser que ces valeurs seraient plus élevées aujourd'hui et donc que le résultat est sous-estimé.

Quoi qu'il en soit, ces valeurs ne sont que des **estimations** et en aucun cas des valeurs exactes. Ces calculs permettent simplement de mettre en lumière le potentiel du marché du vitrage intelligent et de souligner la contribution que **l'électronique imprimée** pourrait y apporter par sa capacité à faire face à de **grandes surfaces**.

## 2. Marché de l'électronique imprimée

Le marché de l'électronique est en plein essor. Certains produits sont désormais commercialisés, mais il reste de nombreuses technologies encore en développement. Le secteur tend donc à s'accroître et est aujourd'hui très concurrentiel. En effet, les entreprises mènent une course à la découverte et à l'innovation. La suite va donc traiter des données économiques et statistiques portant sur le domaine de l'électronique imprimée.

### 2.1. L'électronique imprimée dans le monde

Le marché de l'électronique imprimée est donc divisé en 3 grandes zones géographiques comme le montre le graphique suivant [36]. On retrouve, pour l'électronique imprimée, les pôles les plus importants dans le secteur des évolutions et des innovations technologiques.

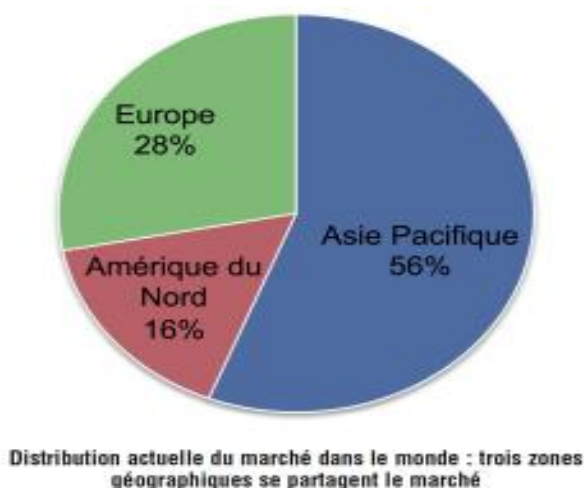


Figure 23 : Distribution du marché de l'électronique dans le monde (Source : Afelim, 2017)

### 2.2. Evolution du marché de l'électronique imprimée

Le graphe ci-dessous présente le chiffre d'affaire généré par l'électronique imprimée selon différentes régions de 2016 à 2023 (prévisions) [32]. APAC correspond à l'Asie Pacifique et ROW correspond au « Reste du monde ».



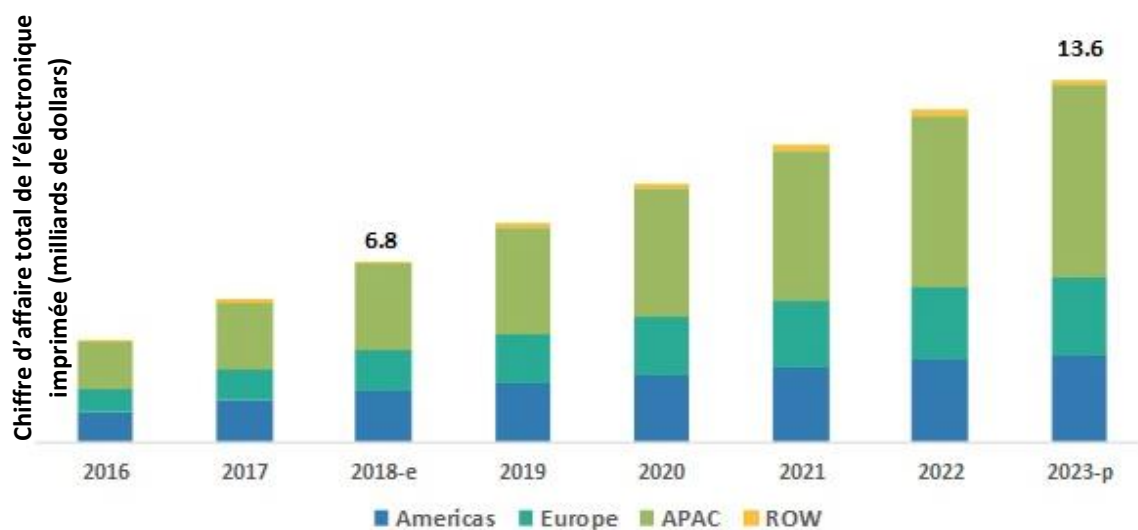


Figure 24 : Le marché de l'électronique imprimée par région (Source : Markets and Markets, 2018)

Ce graphe a été réalisé en 2018. La tendance observée entre 2016 et 2018 est une augmentation progressive du chiffre d'affaire du marché de l'électronique imprimée. Les auteurs de ce graphe prévoient une augmentation de ce chiffre d'affaire qui suivraient la même tendance linéaire jusqu'en 2023. Le marché de l'électronique étant un marché très innovant, cette évolution est plausible. Ce graphe indique également que l'Asie Pacifique domine sur le secteur puisqu'elle détient le chiffre d'affaire le plus important sur le secteur. De nombreux pôles technologiques se trouvent en effet au Japon et en Chine.

Ces prévisions datant de 2018, il est intéressant de comparer avec des prévisions de 2013 [36].

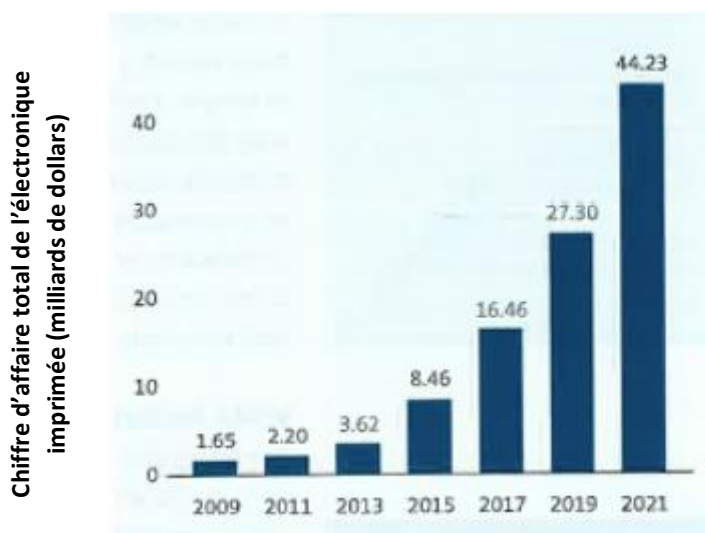


Figure 25 : Evolution du marché entre 2009 et 2021 (Source : IDTechEx 2013)

En 2013, IDTechex prévoyait une multiplication par plus de 26 du chiffre d'affaire de l'électronique imprimée entre 2009 et 2021. Celui-ci atteignait presque 45 milliards de dollars en 2021, contre environ 10 milliards de dollars en 2009 selon la prévision de 2013. IDTechex prévoyait également en 2013 plus de 20 milliards de dollars de chiffre d'affaire en 2018, alors qu'en réalité, ce chiffre a atteint 6,8 milliards de dollars. En 2013, la vision sur l'évolution du marché de l'électronique imprimé était donc très optimiste.

### 2.3. Les parts de marché selon les applications

Dans cette partie, le marché de l'électronique imprimée selon les applications va être étudié. Les filières qui utilisent l'électronique imprimée sont nombreuses. Les figures ci-dessous présentent l'évolution de la répartition du marché de l'électronique imprimée entre 2008 et 2020 pour les différentes applications.

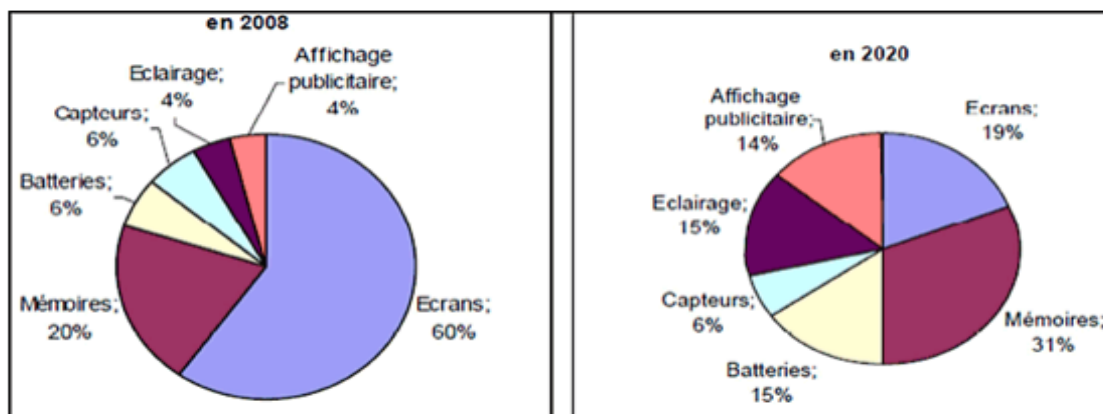


Figure 26 : Évolution du marché de l'électronique imprimée par filière (en % du CA total) (source : IDTechEx, 2017)

Tout d'abord, en 2008, le secteur d'application le plus développé est celui des écrans (60%) suivi par celui des mémoires (20%). On retrouve ensuite des applications en plus petite quantité (de 4 à 6%) avec l'éclairage, les capteurs, les batteries et l'affichage.

Les prévisions faites en 2017 par IDTechEx montrent une évolution marquée des applications peu présentes en 2008 d'ici 2020. En effet, les écrans vont perdre une grande part du marché en passant à 19%. Cela peut s'expliquer notamment par l'augmentation des autres secteurs. La mémoire va prendre encore plus de place dans le développement de ces nouvelles technologies. Les filières qui avaient peu de parts de marché en 2008 devraient trouver leur place en 2020 avec environ 15% des parts de marché.

Dans le domaine des vitrages intelligents, les entreprises vont plus se focaliser sur l'utilisation des écrans, des capteurs et de l'éclairage. Les applications concernées représentent donc environ la moitié du secteur de l'électronique imprimée totale.

Le diagramme ci-dessous présente les prévisions d'évolution des différentes applications de l'électronique imprimée entre 2012 et 2022 [37].

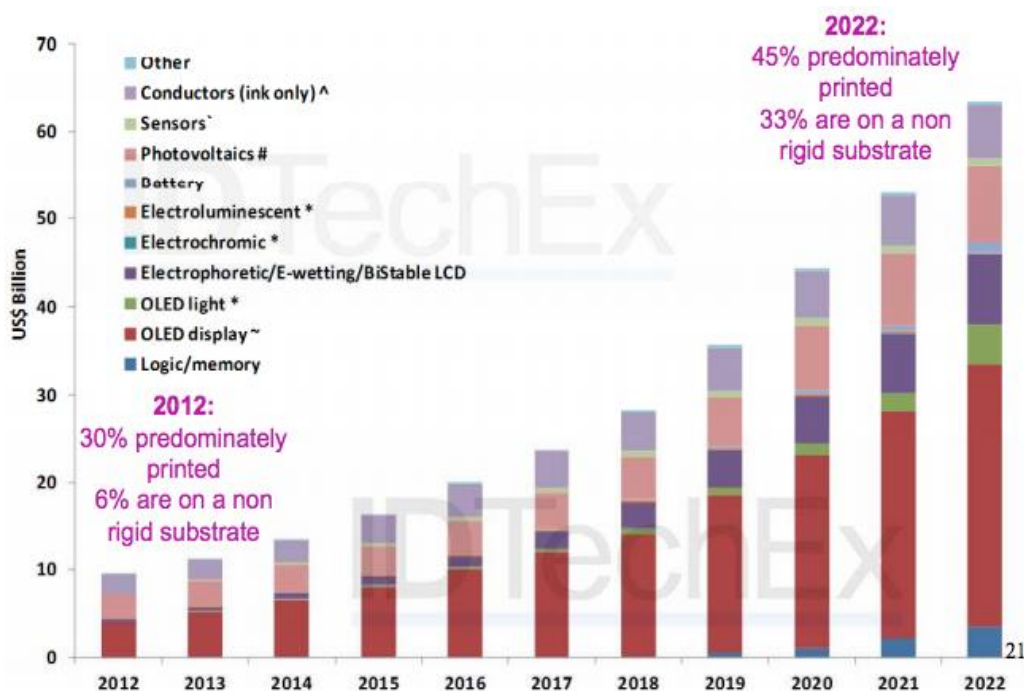


Figure 27 : Prévisions d'évolution du marché de l'électronique imprimée selon les différentes applications  
(Source : IdTechEx 2016)

Ce diagramme permet de mettre en relation les différents diagrammes déjà présentés. En effet, on retrouve la tendance observée qui est une nette augmentation au fil des années (10 milliards de dollars en 2012 et 65 milliards de dollars prévus en 2022). Cette figure présente en plus l'évolution années par années des ventes par secteurs : OLED, batteries, capteurs, etc. Cela permet donc d'établir un lien avec le graphe précédent. La tendance dans ce domaine est donc bien au développement des écrans OLED (5 milliards de dollars en 2012 contre plus de 30 milliards en 2022). Les autres produits aujourd'hui très peu commercialisés mais en plein développement dans les laboratoires comme les batteries, les capteurs, la mémoire, etc. vont, selon les prévisions réalisées par IDTechEx, devenir de plus en plus commercialisés et prendre une réelle place dans le marché de l'électronique imprimée. Ce graphe donne aussi des informations sur l'évolution des technologies au niveau des supports utilisés. En effet, en 2012 6% de tous ces composants sont imprimés sur des substrats non rigides. En 2022, cette donnée passe à 33%. Cela montre qu'au fil des années, les chercheurs réussissent à développer des technologies imprimables sur des supports flexibles, ce qui est un des plus grands défis pour l'électronique imprimée.

Le marché de l'électronique est un marché en plein essor. Cette expansion pourrait aussi permettre de créer de nombreux emplois. IDTechEx envisage 100 000 postes à pourvoir d'ici 15 ans [33] pour mener à bien le développement et l'innovation de ce secteur.

## 2.4. Acteurs de l'électronique imprimée en France

Les principaux acteurs de l'électronique imprimée en France ont été référencés dans le tableau suivant [36].

| Entreprise                                  | Localisation                     | Applications                                     |
|---|----------------------------------|--|
| <b>Electronique</b>                         |                                  |  |
| <b>IEMN</b>                                 | Villeneuve-d'Ascq                | Electronique, microélectronique, nanotechnologie |
| <b>CEA Pic Tic</b>                          | Grenoble                         | Électronique imprimée, capteurs                  |
| <b>IM2NP</b>                                | Marseille                        | Micro-électronique                               |
| <b>Linxens Microtech</b>                    | Vorey (Haute-Loire)              | Composants électronique                          |
| <b>Isorg</b>                                | Grenoble                         | Matériel électronique (capteurs)                 |
| <b>Schneider Electric</b>                   | Grenoble                         | Gestion électricité, automatisation              |
| <b>CTP</b>                                  | Grenoble                         | Développement électronique imprimée              |
| <b>Accelonix</b>                            | Evreux                           | Microélectronique                                |
| <b>APEM</b>                                 | Caussade (Tarn-et-Garonne)       | Interface homme-machine<br>Voyants LED           |
| <b>Encres</b>                               |                                  |  |
| <b>Encres Dubuit</b>                        | Chassieu (Rhône)                 | Encres conductrices                              |
| <b>Genes'Ink</b>                            | Rousset (Bouches-Du-Rhône)       | Encre conductrices                               |
| <b>VFP Ink Technologies</b>                 | Villeneuve-la-Garenne            | Encres et Vernis                                 |
| <b>Polytec</b>                              | Grenoble                         | Résines pour l'électronique                      |
| <b>Exelsius</b>                             | Mouans-sartoux (Alpes-Maritimes) | Systèmes de séchage des encres                   |
| <b>Impressions et systèmes d'impression</b> |                                  |  |
| <b>Ardeje</b>                               | Valence                          | Impression numérique DOD                         |
| <b>Groupe Kerdaiño</b>                      | Pelousey (Doubs)                 | Impressions                                      |
| <b>Ceradrop</b>                             | Limoges                          | Impression jet d'encre                           |
| <b>Thieme</b>                               | Strasbourg                       | Système d'impression                             |
| <b>MGI</b>                                  | Fresnes                          | Presse numérique                                 |

|                              |                          |  |
|------------------------------|--------------------------|--|
| <b>Martin Technologies</b>   | Lézigné (Maine-Et-Loire) | Marquage sur métal                                     |
| <b>Supports d'impression</b> |                          |  |
| <b>Armor</b>                 | Nantes                   | Consommables pour l'impression                         |
| <b>Gergonne industrie</b>    | Oyonnax                  | Adhésifs   |
| <b>Matériaux</b>             |                          |  |
| <b>ADDEV materials</b>       | Lyon                     | Matériaux techniques                                   |
| <b>LCPO-B8</b>               | Pessac                   | Polymères organiques                                   |
| <b>Lumomat</b>               | Angers                   | Matériaux moléculaires pour électronique et photonique |
| <b>Arkema (Piezotech)</b>    | Pierre-Bénite            | Polymère piézoélectrique, électroactif                 |
| <b>Autres</b>                |                          |  |
| <b>Matikem</b>               | Villeneuve d'Ascq        | Innovation et développement                            |
| <b>S2e2</b>                  | Tours                    | Gestion de l'énergie                                   |

Tableau 8 : Tableau des acteurs de l'électronique imprimée en France (Source : Afelim 2017)

Le tableau suivant référence les acteurs majeurs mondiaux dans chaque secteur [37] de l'électronique imprimée.

| Secteur                        | Entreprises  |
|--------------------------------|--|
| <b>OLED pour affichage</b>     | Samsung, LG, eMagin  |
| <b>OLED</b>                    | UDC, Dow Chemical, Novaled/Samsung                                 |
| <b>Encres conductrices</b>     | Dupont, InkTec, Johnson Mattney, Heraeus Group, Creative materials |
| <b>Capteurs</b>                | GSI Technologies   |
| <b>Equipements</b>             | Fujifilm Dimatix, Ceradrop, Unijet, Optomec, Roth & Rau            |
| <b>Emballages Intelligents</b> | T-Ink, Avery Dennison, MWV   |

Tableau 9 : Tableau des principaux acteurs de l'électronique imprimée selon le secteur d'application

### 3. Marché du vitrage intelligent

---

Le **diagramme de Porter** est un outil permettant d'analyser les différents intervenants économiques susceptibles d'influencer l'évolution d'un marché. Il recense les produits et acteurs représentant des menaces pour le marché en question ainsi que le pouvoir de négociation que possèdent les clients et fournisseurs.

Sur le marché des vitres, les nouveaux entrants considérés ici sont les vitrages intelligents. Ils représentent une menace pour ce marché. Les fournisseurs des fabricants des vitrages intelligents qui ont été considérés ici sont les fabricants des vitres classiques ainsi que les fournisseurs d'encre conductrices pour l'électronique imprimée. La R&D est également un facteur prépondérant pour l'avenir du marché des vitrages intelligents. Les films conducteurs à coller sur les vitres, eux, sont des produits de substitution des vitrages intelligents qui peuvent constituer une menace. En effet, ceux-ci présentent l'avantage d'être facilement changeables. Dans la mesure où les pistes conductrices imprimées ne sont pas particulièrement durables dans le temps, il est préférable d'avoir à changer un film plutôt qu'une vitre.

Les clients du marché du vitrage sont les constructeurs de bâtiments. Ceux-ci dépendent de leurs propres clients, qui eux ont un pouvoir de négociation sur le marché du vitrage. Ce sont eux qui vont avoir une influence forte sur le marché du vitrage et qui peuvent potentiellement faire croître le marché du vitrage intelligent.

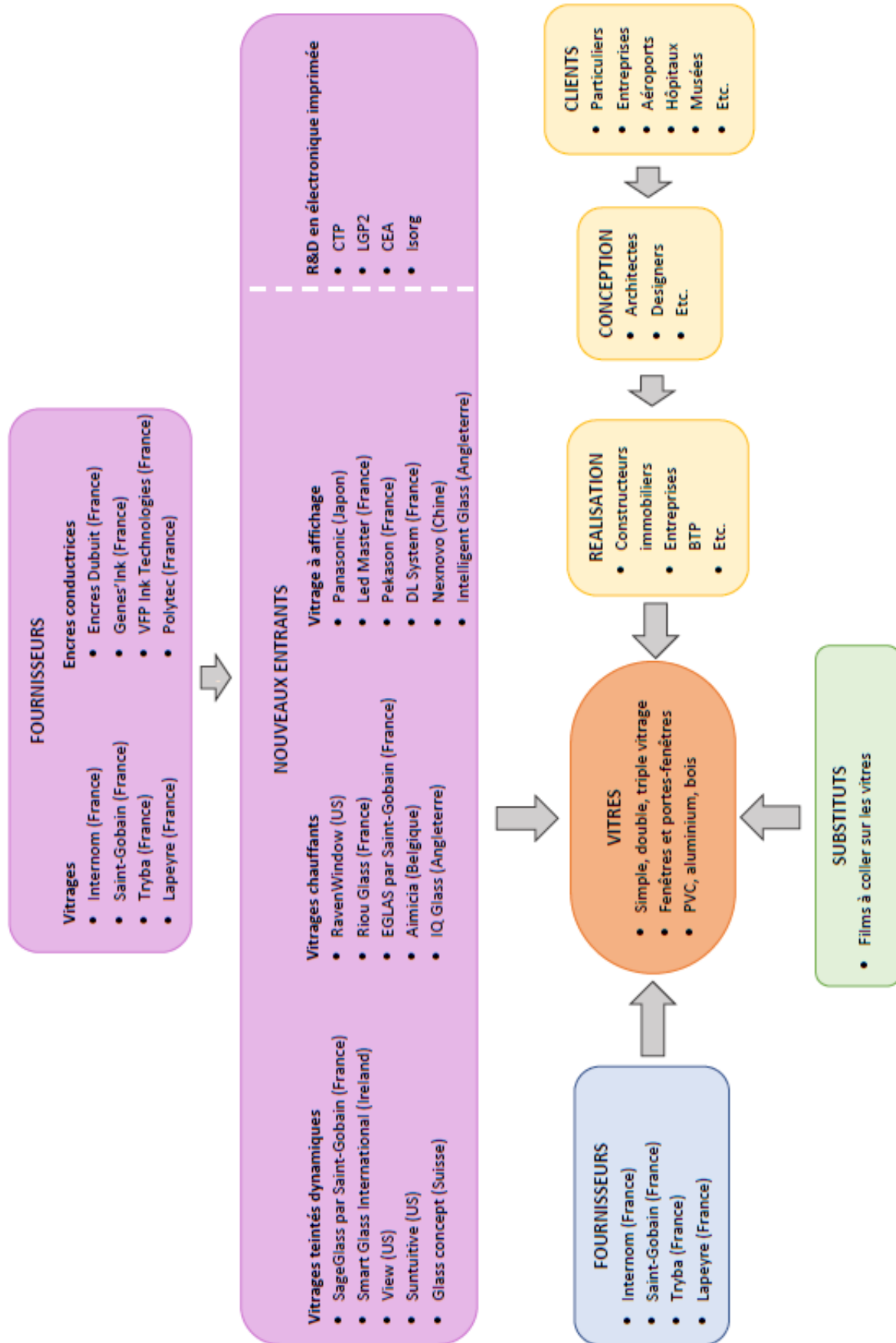


Figure 28 : Diagramme de Porter du secteur du vitrage

# V. PERSPECTIVES D'EVOLUTION

## 1. Variables essentielles

---

Les **variables internes** dépendent directement des performances et des contraintes liées au produits lui-même. Ici, les variables internes qui ont été identifiées sont les suivantes :

- ✓ Performances atteintes par l'électronique imprimée : si l'électronique imprimée se développait suffisamment pour atteindre des niveaux de performances électroniques comparables à ceux de l'électronique conventionnelle, cela serait un réel moteur au développement des vitrages intelligents. Au contraire, si le développement de l'électronique imprimée était limité, cela serait un frein à l'expansion des vitrages intelligents.
- ✓ Coût : les vitrages intelligents sont beaucoup plus chers que des vitrages classiques. Ils devront se faire une très belle image auprès du grand public avant de pouvoir être démocratisés.
- ✓ Durée de vie : le vitrage est une partie des bâtiments qui ne se change pas régulièrement. Il ne s'agit pas là d'un appareil électronique destiné à être remplacé après 2 ou 3 années d'utilisations comme des smartphones, ni même après 8 à 10 ans comme des téléviseurs. Le vitrage doit pouvoir durer presque autant de temps que le bâtiment lui-même, ou au mieux être rénové après une vingtaine d'années. Or, la durabilité des vitrages intelligents, n'excédant vraisemblablement pas 15 ans aujourd'hui, peut s'avérer problématique.

Les **variables externes**, elles, ne dépendent pas directement du produit lui-même. Il s'agit de facteurs pouvant influencer l'avenir du produit, sans que les performances ou le développement de celui-ci n'en soient responsables. Les variables externes ayant été identifiées sont les suivantes :

- ✓ Réglementation : celle-ci pourrait favoriser le développement des vitrages intelligents en appuyant l'économie énergétique qu'ils offrent ou au contraire, s'y opposer, par exemple en imposant de réduire les surfaces vitrées dans les bâtiments, qui sont des sources de déperditions énergétiques.
- ✓ Objets connectés (IoT) : l'expansion du nombre d'objets électroniques connectés à internet pourrait s'appliquer aux vitrages.
- ✓ Question de la santé publique (nanoparticules) : les vitres font partie de notre quotidien et nous sommes régulièrement en contacts avec celles-ci. Or, les encres conductrices sont souvent constituées de nanoparticules, réputées pour être dangereuses pour la santé. Cela pourrait ternir l'image des vitrages intelligents et donc limiter leur développement.



## 2. Facteurs clés du développement

Les facteurs clés du développement sont des facteurs qui sont primordiaux pour la croissance du marché des vitrages intelligents. Sans le développement de ceux-ci, les vitrages intelligents ne peuvent se développer. Deux facteurs clés du développement ont été identifiés :

- L'impression sur verre : augmentation de la productivité.
- Les encres transparentes conductrices : développement des formulations à partir de graphène, PEDOT-PSS, nanotubes de carbone afin de remplacer l'ITO (Indium Tin Oxyde) qui est coûteux.

## 3. Matrices SWOT

La matrice SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) est un outil permettant d'analyser les atouts et défauts d'un marché. Elle intègre des paramètres **internes** au marché qui sont ses forces et ses faiblesses, ainsi que des paramètres qui lui sont **externes** qui sont ses opportunités et menaces.

Deux matrices SWOT ont ici été réalisées. L'une analyse l'utilisation de l'électronique imprimée pour la production des vitrages intelligents comme alternative aux procédés conventionnels l'électronique. L'autre étudie le marché des vitrages intelligents par rapport aux vitres classiques "inertes".

### 3.1. Matrice SWOT 1 : Electronique imprimée pour vitrages intelligents par rapport aux procédés conventionnels

|   |   |                 |
|---|---|-----------------|
| <b>FORCES</b> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Productivité élevée avec des coûts faibles de production</li><li>▪ Adaptation à des substrats divers notamment le verre</li><li>▪ Machines de production déjà opérationnelles</li></ul>                                 | <b>FAIBLESSES</b> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Niveaux de performances moindres par rapport aux procédés conventionnels</li></ul>  | <b>INTERNES</b> |
| <b>OPPORTUNITES</b> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Un marché à saisir pour les imprimeurs</li><li>▪ Croissance du marché de l'électronique imprimée</li><li>▪ Développement des nouveaux matériaux pour l'électronique imprimée (graphène, CNT, PEDOT-PSS)</li></ul> | <b>MENACES</b> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Diminution des coûts des procédés conventionnels</li><li>▪ Augmentation de la productivité des procédés conventionnels</li></ul> |                 |
| <b>FAVORABLES</b>   | <b>DEFAVORABLES</b>   |                 |

### 3.2. Matrice SWOT 2 : Vitrages intelligents par rapport aux vitrages classiques

|  |   |                 |
|--|---|-----------------|
| <p style="text-align: center;"><b>FORCES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Technologies électrochromisme, LC et SPD déjà existantes</li> <li>▪ Économies d'énergie</li> </ul>   | <p style="text-align: center;"><b>FAIBLESSES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Prix élevé par rapport au besoin</li> <li>▪ Suivi et maintenances nécessaires plus "lourds" que pour des vitres conventionnelles</li> <li>▪ Durée de vie des composants imprimés limite la durée de vie des vitres</li> </ul> | <b>INTERNES</b> |
| <p style="text-align: center;"><b>OPPORTUNITES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Importance de la domotique dans les bâtiments</li> <li>▪ Développement des objets connectés (IoT)</li> <li>▪ Réglementation va dans le sens des vitrages intelligents pour lisser les flux énergétiques</li> </ul> | <p style="text-align: center;"><b>MENACES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dangerosité des encres fonctionnelles (nanoparticules d'argent notamment)</li> <li>▪ Diminution des surfaces vitrées dans les bâtiments (sous l'effet d'une réglementation stricte par exemple)</li> </ul>                       | <b>EXTERNES</b> |
| <b>FAVORABLES</b>  | <b>DEFAVORABLES</b>   |                 |

## 4. Scénarios

### 4.1. Scénario 1 : Optimiste

*En 2030, la grande majorité des bâtiments sont équipés de vitrages fonctionnels.*

**Hypothèses :**

- *Les procédés d'impression ont permis une large expansion de ces vitrages (Probabilité 65%)*
- *Une législation est entrée en vigueur sur l'utilisation de fenêtres intelligentes pour les économies d'énergie (Probabilité 30%)*
- *Le prix des matières organiques utilisées a chuté permettant une industrialisation de ces systèmes (Probabilité 25%)*

Les vitrages intelligents développés en laboratoire sont fonctionnels dans les années 2020. C'est alors au cours de ces années que la commercialisation de ces fenêtres a nettement augmenté. Toutes les nouvelles constructions sont donc désormais dotées de ces nouvelles technologies. En effet, l'industrialisation de l'électronique imprimée organique a permis une baisse des prix de la matière conductrice. Cela a donc poussé les industries à investir dans ce marché prometteur. C'est donc pourquoi ce marché a vu éclore un partenariat entre Schneider et Isorg pour s'emparer d'une grande partie du marché européen (60%).

De plus, une législation a été mise en vigueur sur l'équipement des bâtiments possédant de nombreuses fenêtres. Celle-ci oblige les concepteurs des bâtiments à installer des vitrages intelligents pour des questions de réduction de la consommation d'énergie. En effet, les vitres dont la teinte se modifie selon la lumière va permettre de diminuer l'énergie consommée pour l'éclairage intérieur. Ainsi, les vitres chauffantes vont permettre de limiter l'installation de systèmes de chauffage dans les locaux.

En 2030, tous les locaux, hors habitations domestiques, possèdent des vitres intelligentes. On recense 60% des installations habitables équipées de vitrages intelligents.

➔ *Probabilité de réalisation de ce scénario : 40%*

## 4.2. Scénario 2 : Tendancier

***En 2040, l'électronique imprimée est utilisée dans la fabrication de la moitié des vitres intelligentes commercialisées.***

### Hypothèses :

- *L'électronique imprimée organique sort de la phase de développement et se commercialise (Probabilité : 70%)*
- *Les prix de ces fenêtres n'est pas accessible à tous (Probabilité 60%)*
- *Des technologies permettant l'utilisation des procédés d'impression pour la fabrication de ces vitres ont été industrialisées (Probabilité 25%)*

L'électronique imprimée organique s'est développée de façon industrielle. Certains ont donc saisi l'occasion d'enrichir leur gamme de produits avec ces vitres fonctionnelles.

En effet, des entreprises comme SmartGlass International ou Saint-Gobain ont développé une large gamme de vitrages intelligents qui sera installée sur de nombreux bâtiments. 55% des vitres installées depuis 2033 en France proviennent de Saint-Gobain.

Les matières nécessaires à l'insertion de l'électronique dans les vitres par le biais de l'impression restent encore très onéreuses. C'est pourquoi ces nouveaux systèmes restent accessibles seulement aux plus aisés. Ces systèmes se retrouvent donc pour la plupart dans des locaux d'entreprises.

De plus, les performances de ces vitrages intelligents montrent un gain d'énergie par rapport à l'utilisation des fenêtres classiques. C'est dans cette optique de protection de l'environnement que le gouvernement met en place des subventions pour toutes installations de ces nouvelles technologies de fenêtres intelligentes.

➔ *Probabilité de réalisation de ce scénario : 55%*

### 4.3. Scénario 3 : Pessimiste

*En 2050, le marché du vitrage intelligent s'est développé sans l'électronique imprimée.*

#### Hypothèses :

- *Le développement de ces vitres est trop cher en électronique imprimée. (Probabilité : 30%)*
- *Les encres conductrices sont trop dangereuses pour la production industrielle (nanoparticules). (Probabilité : 40%)*
- *Législations trop lourdes et réglementations trop importantes bloquent le développement des vitres intelligentes dans le domaine de l'électronique imprimée. (Probabilité : 35%)*

Le vitrage intelligent est en pleine expansion et les normes s'intéressent de plus près à ce sujet. Ainsi, les législations et les réglementations sont de plus en plus drastiques d'un point de vue écologique, éco-conception et recyclage. Le but de ces normes est de rendre le produit le plus "éco" possible.

De plus, les encres conductrices utilisées par l'électronique imprimée sont composées de nanoparticules dangereuses pour la santé ainsi, l'entreprise Saint-Gobain est dans l'obligation de mettre en place les équipements nécessaires à la protection de ces nanoparticules, afin d'assurer de bonnes conditions de travail pour ses employés.

Ces deux facteurs rendent donc la production de vitrages intelligents par l'électronique imprimée très onéreuse. Le prix de ces fenêtres a donc augmenté jusqu'à un certain seuil puis, dépassé celui-ci, le marché du vitrage intelligent pour l'électronique imprimée s'est écroulé. L'électronique imprimée n'a donc pas réussi à garder ce marché et l'entreprise Saint Gobain a coulé.

➔ *Probabilité de réalisation de ce scénario : 35%*

## VI. CONCLUSION

Le vitrage est un élément essentiel de tout bâtiment, qu'il s'agisse d'habitations, de bureaux, d'écoles, d'aéroports, d'hôpitaux, etc. Comme la plupart des objets, les vitres sont-elles aussi amenées aujourd'hui à évoluer et à prendre le virage du numérique (*cf. II*). Si la fonctionnalisation du vitrage a commencé il y a plus d'un siècle avec l'invention du double vitrage qui permet d'optimiser l'isolation (*cf. III-1.1.*), celle-ci continue aujourd'hui avec l'apparition des vitrages intelligents.

Les fonctionnalités proposées par ces vitrages intelligents sont principalement des vitres à teinte variable, permettant de laisser plus ou moins passer le rayonnement solaire. Si

cela présente des fins de domotique, la finalité porte également sur l'aspect environnemental de ces vitrages du fait de l'optimisation du recours à l'énergie (pour le chauffage et l'éclairage notamment) dans les bâtiments (cf. III-1.2.). Trois technologies principales sont présentes sur le marché : les vitres électrochromes, les dispositifs à particules en suspension et les vitres à cristaux liquides, dont les principes de fonctionnement ont été décrits dans ce rapport (cf. III-1.3.). Si ces technologies sont très intéressantes, elles restent encore très coûteuses et réservées à une « élite ». Ces vitrages sont effectivement très en vogue dans les grandes entreprises. Le siège social de Microsoft à Lisbonne par exemple est un bâtiment employant ces technologies (cf. Figure 9). Le coût de ces vitrages intelligents devra donc nettement baisser avant que ceux-ci se démocratisent.

Par ailleurs, l'électronique imprimée (cf. III-2.), c'est-à-dire l'emploi des procédés d'impression pour la fabrication de composants électroniques, connaît une croissance phénoménale. Un de ses avantages notables est sa capacité à faire face à de grandes surfaces d'impression. Il s'agit dès lors d'une « arme » potentielle pour le développement des vitrages intelligents. En effet, si ceux-ci sont encore très chers, c'est en partie car leur fabrication est longue et coûteuse puisque les procédés conventionnels de fabrication de composants électroniques utilisés ne sont pas prévus pour des surfaces aussi importantes que celle que représentent les vitrages. Combiner l'électronique imprimée à la fabrication des vitrages intelligents serait donc pertinent (cf. III-3.). Néanmoins, les produits issus de l'électronique imprimée devront encore faire leurs preuves en termes de performances avant de pouvoir toucher un tel secteur.

D'un point de vue économique, le marché du vitrage (fenêtres, portes vitrées, etc.) est un marché porteur puisqu'il va de pair avec celui du bâtiment et que dans un contexte de transition écologique, la rénovation est aussi un moteur (cf. IV-1.). La réglementation va également dans le sens de la croissance du marché des vitrages, poussant à la pose de fenêtres aux performances énergétiques toujours meilleures. Le marché de l'électronique imprimée, lui aussi, est aussi en plein essor (cf. IV-2.). Les perspectives offertes par cette technologie relativement récente sont nombreuses et de plus en plus d'acteurs se positionnent sur ce marché. La R&D est également particulièrement active. Ainsi, le marché du vitrage intelligent se trouve à la croisée de deux chemins prometteurs et les perspectives sont nombreuses. Toutefois, certaines variables vont être déterminantes pour l'avenir de ce produit (cf. V-1.). Certaines sont directement dépendantes de l'évolution des vitrages intelligents (coût, performances, durée de vie), d'autres sont des variables collatérales, comme la question de la santé (présence de nanoparticules) ou la réglementation, dont il est difficile de prédire l'évolution. Le scénario le plus probable semble décrire une évolution du marché des vitrages intelligents sans pour autant que ces derniers soient démocratisés dans un avenir proche (cf. V-4.).

La problématique posée par ce rapport visait à savoir si l'électronique imprimée était la solution permettant de développer largement les vitrages intelligents. Sans établir un verdict quant au fait que les vitrages intelligents vont ou non se démocratiser, il est probable que si le développement des vitrages intelligents est important, il sera appuyé par l'utilisation de l'électronique imprimée d'ici quelques années. En revanche, si l'ampleur du

développement du secteur des vitrages intelligents est minime, alors la pertinence de l'électronique imprimée est moins évidente. D'un autre point de vue, si l'électronique imprimée, et notamment l'électronique imprimée sur verre et avec des encres transparentes, se développait largement dans les prochaines années, alors cela serait potentiellement un des facteurs clés du développement des vitrages intelligents (cf. V-2).

La fonctionnalisation des vitrages peut être portée encore plus loin. Les vitres du futur pourraient également présenter des fonctionnalités autres que de simples teintes variables. Des vitres à affichages, comme on peut en voir dans les films, constituent un « fantasme » qui n'est pourtant aujourd'hui pas si éloigné de la réalité (cf. III-3.3.). Dans la maison du future, les fenêtres ne seront peut-être plus uniquement l'interface entre l'intérieur et l'extérieur de la maison, mais peut-être également l'interface connectant au reste du monde via Internet...

## VII. TABLE DES FIGURES

|  |    |
|--|----|
| Figure 1. La lampe DAL de la société Violet (Source : Journaldulapin.com)  | 6  |
| Figure 2. L'Apple Watch, la montre connectée d'Apple   | 6  |
| Figure 3. La caméra connectée Withings   | 6  |
| Figure 4. Le Parrot Flower Power   | 6  |
| Figure 5 : Les Google Glass (Source : Wikipédia)   | 7  |
| Figure 6 : MySmartMirror (Source : www.mysmartmirror.co.uk)  | 7  |
| Figure 7. Evolution du marché français de la fenêtre (Source : UFME, Etude du marché de la fenêtre en France en 2017, Septembre 2018)              | 8  |
| Figure 8. Cloisons en verre intelligent dans une suite d'hôtel (Source : "Peek-a-boo" Effect – LC SmartGlass for Hotel Bathroom Interiors)         | 10 |
| Figure 9. Cloison en verre intelligent dans les bureaux de Microsoft à Lisbonne (Source : Smart Glass International)                               | 10 |
| Figure 10. Façade en vitrage intelligent (Source : Smart Films International, Electrochromic glass)  | 10 |
| Figure 11. Schéma du fonctionnement de la technologie LC (Source : Smart Glass International. Electronically Switchable Glass Handbook. 2009. 55p) | 12 |
| Figure 12. Vitrages électrochromes (Source : Smart Films International, Electrochromic glass)  | 12 |
| Figure 13. Schéma du fonctionnement de la technologie de l'électrochromisme (Source : Smart film international. Electrochromic glass)              | 13 |
| Figure 14. Schéma du fonctionnement de la technologie SPD (Source : Smart Glass International. SPD SmartGlass Overview)                            | 14 |
| Figure 15. Différents types de capteurs (Source : idtechex.com)  | 22 |
| Figure 16. OLED imprimées sur un support flexible (source : lejournal.cnrs.fr)   | 22 |
| Figure 17. Schéma du fonctionnement de l'OLED (source : ecranflexible.com)   | 23 |
| Figure 18. Antenne RFID  | 23 |
| Figure 19. La dalle OLED de Panasonic (source - www.lesnumeriques.com)   | 26 |
| Figure 20. Le Métapapier du CTP (source - www.futura-sciences.com)   | 27 |
| Figure 21 : Les différentes parties d'une fenêtre (source - www.energieplus-lesite.be)   | 28 |
| Figure 22 : Répartition des ventes des fenêtres selon leur coefficient de déperdition thermique (Source : UFME, 2018)                              | 29 |
| Figure 23 : Distribution du marché de l'électronique dans le monde (Source : Afelim, 2017)   | 32 |
| Figure 24 : Le marché de l'électronique imprimé par région (Source : Markets and Markets, 2018)  | 33 |
| Figure 25 : Evolution du marché entre 2009 et 2021 (Source : IDTechEx 2013)  | 33 |

Figure 26 : Évolution du marché de l'électronique imprimée par filière (en % du CA total) (source : IDTechEx, 2017) \_\_\_\_\_ 34  
Figure 27 : Prévisions d'évolution du marché de l'électronique imprimée selon les différentes applications (Source : IdTechEx 2016) \_\_\_\_\_ 35  
Figure 28 : Diagramme de Porter du secteur du vitrage \_\_\_\_\_ 39

## VIII. TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1. Comparaison des technologies de vitres intelligentes \_\_\_\_\_ 14  
Tableau 2. Tableau de comparaison des différents procédés utilisés en électronique imprimée \_\_\_\_\_ 17  
Tableau 3. Tableau récapitulatif des différents matériaux utilisés en électronique imprimée \_\_\_\_\_ 19  
Tableau 4. Avantages et inconvénients des différents substrats pour la fonctionnalisation de vitrages \_\_\_\_\_ 21  
Tableau 5 : Dimensions standards des fenêtres en France permettant de calculer la surface moyenne \_\_\_\_\_ 30  
Tableau 6 : Nombre de fenêtres en France permettant de calculer la surface vitrée moyenne \_\_\_\_\_ 30  
Tableau 7 : Surface moyenne par habitant permettant de calculer la surface vitrée minimale moyenne en France, selon les contraintes de la RT2012 \_\_\_\_\_ 31  
Tableau 8 : Tableau des acteurs de l'électronique imprimée en France (Source : Afelim 2017) \_\_\_\_\_ 37  
Tableau 9 : Tableau des principaux acteurs de l'électronique imprimée selon le secteur d'application \_\_\_\_\_ 37

## IX. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Wikipedia. Fenêtre [En ligne]. Disponible sur : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Fen%C3%AAtre> (Consulté le 18.02.2019)
- [2] Internorm. Un peu d'histoire sur les fenêtres [En ligne]. Disponible sur : <https://www.internorm.fr/actus/fenetres/un-peu-dhistoire-sur-les-fenetres/> (Consulté le 18.02.2019)
- [3] Stéphane Vigliandi. Les 5 chiffres-clés du marché français des fenêtres [En ligne]. Disponible sur : <https://tokster.com/article/les-5-chiffres-cles-du-marche-francais-des-fenetres> (Consulté le 18.02.2019)
- [4] UFME. Etude du marché de la fenêtre en France en 2017 [En ligne]. Septembre 2018. Disponible sur : [http://www.ufme.fr/sites/default/files/actualites/synthese\\_ufme\\_marche\\_fenetre\\_2017.pdf](http://www.ufme.fr/sites/default/files/actualites/synthese_ufme_marche_fenetre_2017.pdf) (Consulté le 18.02.2019)
- [5] Groupe Teintéo. Vitres teintées [En ligne]. Disponible sur : <http://www.teinteo.com/vitres-teintees> (Consulté le 18.02.2019)
- [6] M. BEEVOR. Smart Building Envelopes [En ligne]. University of Cambridge. 2010. Disponible sur : <https://www.gft.eng.cam.ac.uk/media/final-report-front-page-mbeevor.pdf> (Consulté le 18.02.2019)

- [7] Smart Films International. Electrochromic Glass [En ligne]. Disponible sur : <http://smartfilmsinternational.com/wp-content/uploads/solar/SFI-Electrochromic-brochure.pdf> (Consulté le 18.02.2019)
- [8] LC Smart Glass. Electronically Switchable Glass Handbook [En ligne]. 2008. Disponible sur : [http://www.smartglassinternational.com/downloads/LC\\_SmartGlass\\_HandbookOLD.pdf](http://www.smartglassinternational.com/downloads/LC_SmartGlass_HandbookOLD.pdf) (Consulté le 18.02.2019)
- [9] BELLAS Marine - QUEMIN Maxime Smart building : construction de bâtiments intelligents, apport de l'électronique imprimée, 12 mai 2017, 52p.
- [10] Objets connectés : histoire et définitions [En ligne]. Disponible sur <https://www.objetconnecte.net/histoire-definitions-objet-connecte/> (Consulté le 18.02.2019)
- [11] L'état des lieux des objets connectés aujourd'hui [En ligne]. Disponible sur : <https://www.connect-object.com/histoire-des-objets-connectes/> (Consulté le 18.02.2019)
- [12] Chansin, DrGuillaume. Printed and Flexible Sensors 2017-2027: Technologies, Players, Forecasts. IDTechEx, Novembre 2016 [En ligne]. Disponible sur : <https://www.idtechex.com/research/reports/printed-and-flexible-sensors-2017-2027-technologies-players-forecasts-000504.asp> (Consulté le 07.03.2019)
- [13] R.Faddoul, "Procédés d'impression dédiés à la production de masse de microcomposants électroniques à base de céramique", 2012, PhD, Université de Grenoble
- [14] Dragan J. Gavrilović, Jasmina Stojić. Usage of "smart" glass panels in commercial and residential building. University of Kosovska Mitrovica, Faculty of Technical Sciences, Department of Architecture, Serbia University of Niš, Faculty of Civil Engineering and Architecture Niš, Serbia. 2011.
- [15] Définition de biocapteur [En ligne]. Disponible sur <https://www.aquaportail.com/definition-8394-biocapteur.html> (Consulté le 07.03.2019)
- [16] Anon. "Technologie OLED" [En ligne]. Disponible sur : <https://www.ecranflexible.com/definition-technologie-oled> (Consulté le 07.03.2019)
- [17] NDIAYE Khadidiatou LEBORGNE Aymeric. Comprendre la technologie RFID. IUT Villetaneuse Paris 13e [En ligne]. Disponible sur [https://lipn.univ-paris13.fr/~loddoo/files/PROJETS-TUTORES\\_2016-17/RAPPORTS\\_2017/g08\\_FABRE\\_projet\\_RFID\\_LEBORGNE\\_NDIAYE.pdf](https://lipn.univ-paris13.fr/~loddoo/files/PROJETS-TUTORES_2016-17/RAPPORTS_2017/g08_FABRE_projet_RFID_LEBORGNE_NDIAYE.pdf) (Consulté le 07.03.2019)



- [18] R. Bollström, « Paper for printed electronics and functionality », 2013, *PhD*, Abo Akademi University, Finland.
- [19] V. Faure, « Contrôle de la formation de motifs conducteurs par jet d'encre : maîtrise multi-échelle des transferts de matière dans des suspensions nanométriques », 2017, PhD, Université de Grenoble [En ligne]. Disponible sur <<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01777740v2/document>> (Consulté le 9.03.2019)
- [20] BLAYO, Anne et PINEAUX, Bernard. "Printing processes and their potentials for RFID printing". SOC-EUSAI Proceedings. 2005. [En ligne]. Disponible sur <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=13F8754A932237BF88DAB1BD034FE197?doi=10.1.1.458.8551&rep=rep1&type=pdf>> (Consulté le 09.03.2019)
- [21] GHIBAUDO, Thomas et HE, Ruoxue. Impression 3D & électronique imprimée associées. CERIG. Mai 2016. [En ligne] disponible sur : <<http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/memoire/2016/impimpression3D-electronique-imprimee.htm>> (Consulté le 09.03.2019)
- [22] Anon. Matériaux. AFELIM. [En ligne] Disponible sur <[www.afelim.fr/materiaux\\_39.htm](http://www.afelim.fr/materiaux_39.htm)> (Consulté le 09.03.2019).
- [23] Fenêtres NF, la qualité sous contrôle. [En ligne] Disponible sur : <<https://fenetres-nf.fr/reglementation/>> (Consulté le 09.03.2019)
- [24] Internorm. Quelles normes pour les fenêtres [En ligne] Disponible sur : <<https://www.internorm.fr/actus/fenetres/quelles-normes-pour-les-fenetres/>> (Consulté le 09.03.2019)
- [25] Des batteries au zinc imprimables, ultrafines, souples et bon marché [En ligne] Disponible sur : <<https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/technologie-batteries-zinc-imprimables-ultrafines-souples-bon-marche-44376/>> (Consulté le 09.03.2019)
- [26] Ines KHARRAT. "Modélisation et réalisation d'un système de récupération d'énergie imprimé Caractérisation hyperfréquence des matériaux papiers utilisés." 2014 Grenoble.
- [27] Tanguy Andrillon. IFA 2016 – Un TV transparent de 55" dès 25 000 euros, dispo en 2019 [En ligne]. 2016. Disponible sur : <<https://www.lesnumeriques.com/tv-televiseur/ifa-2016-tv-transparent-55-25-000-euros-dispo-en-2019-n55361.html>> (Consulté le 10.03.2019)
- [28] Hast J., Tuomikoski M., Suhonen R. et al. Roll-to-Roll Manufacturing of Printed OLEDs. Rapport N°18.1. VTT Technical Research Centre of Finland, Oulu, Finland. 2013.
- [29] Google Glass. Wikipédia [En ligne]. Disponible sur : <[https://fr.wikipedia.org/wiki/Google\\_Glass](https://fr.wikipedia.org/wiki/Google_Glass)> (Consulté le 25.04.2019)

- [30] MySmartMirror [En ligne]. Disponible sur : <<https://www.mysmartmirror.co.uk/>> (Consulté le 25.04.2019)
- [31] Gentex Corporation. Equipements automobiles [En ligne]. Disponible sur : <<http://www.gentex.com/fr/automobile/produits/driver-safety#36>> (Consulté le 25.04.2019)
- [32] Printed electronics Market by Material (Inks and Substrates), Technology (Inkjet, Screen, Gravure, and Flexographic), Device (Sensors, Displays, Batteries, RFID tags, Lighting solutions/panels, and PV Cells), Industry, and Geography - Global Forecast to 2023. [En ligne]. Disponible sur <[https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/printed-electronics-market-197.html?gclid=Cj0KCQjwg73kBRDVARIsAF-kEH9mXBEIWG1F2B7MlzPQ0cxMIDfh17Q9hNhNKSz6VajEb6Hpm1Z1QUEaAj3CEALw\\_wcB](https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/printed-electronics-market-197.html?gclid=Cj0KCQjwg73kBRDVARIsAF-kEH9mXBEIWG1F2B7MlzPQ0cxMIDfh17Q9hNhNKSz6VajEb6Hpm1Z1QUEaAj3CEALw_wcB)> (Consulté le 18.03.2019)
- [33] RIDHA LOUKIL. Electronique imprimée : la France passe-t-elle à côté d'une filière d'avenir ? [En ligne]. 2013. Disponible sur <<https://www.usine-digitale.fr/editorial/electronique-imprimee-la-france-passe-t-elle-a-cote-d-une-filiere-d-avenir.N194227>> (Consulté le 18.03.2019)
- [34] Kpark. Dimension standard d'une fenêtre [En ligne]. Disponible sur : <<https://www.kpark.fr/guides-et-conseils/guide-d-achat/quelle-est-la-dimension-d-une-fenetre-standard>> (Consulté le 20.03.2019)
- [35] 20 minutes. Les Français vivent en moyenne dans 91m2 [En ligne]. Disponible sur : <<https://www.20minutes.fr/societe/1596367-20150428-cinq-choses-savoir-conditions-logement-francais>> (Consulté le 20.03.2019)
- [36] Anne-Lise Maréchal, L'Électronique imprimée, un marché prometteur. Afelim, Lille 2017.
- [37] Thomas GHIBAUDO et Ruoxue HE, Impression 3D & électronique imprimée associées. Mai 2016 [En ligne]. Disponible sur : <<http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/memoire/2016/impression3D-electronique-imprimee.htm>> (Consulté le 20.03.2019)
- [38] EnergiePlus-lesite. Le coefficient de transmission thermique d'une fenêtre ou d'une porte. [En ligne] Disponible sur : <<https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16893#c20932597>> (Consulté le 28.03.2019)
- [39] CSTC. Smart buildings for smart cities [En ligne]. Juillet 2018. Disponible sur : <[https://www.cstc.be/homepage/download.cfm?lang=fr&dtype=publ&doc=SMART\\_BUILDINGS\\_FOR\\_SMART\\_CITIES\\_FR.pdf](https://www.cstc.be/homepage/download.cfm?lang=fr&dtype=publ&doc=SMART_BUILDINGS_FOR_SMART_CITIES_FR.pdf)> (Consulté le 28.03.2019)