

Stretchable Electronics – Opportunités pour les procédés d'impression dans le secteur du smart textile

Rapport de Veille Technologique & Intelligence Economique

Guillaume BERNARDIN – Iliana BLANCHET – Mathilde CENOU

03/06/2020

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	4
I. RAPPORT TECHNIQUE	6
1. L'électronique imprimée : définition [1] [2]	6
2. Procédés d'impression [1] [3].....	7
2.1 L'offset.....	7
2.2 La sérigraphie	7
2.3 Le flexographie	7
2.4 L'héliogravure.....	8
2.5 Le jet d'encre	8
3. Les encres [1] [3]	8
3.1 Les encres métalliques	9
3.2 Les encres organiques	10
a. Les encres à bases de polymères conducteurs organiques.....	10
b. Les encres à case de particules de carbone	12
3.5 Les oxydes transparents conducteurs	12
4. Les substrats [13] [14]	12
4.1 Les substrats en polymère.....	13
4.2 Les substrats en papier.....	13
5. Application générales [14] [15]	14
5.1 Les capteurs.....	14
5.2 Les OLEDs.....	15
5.3 La RFID	15
5.4 La gestion de l'énergie.....	16
6. L'électronique imprimée étirable.....	17
6.1 Matériaux utilisés	17
6.2 Propriétés et mesures mises en jeu	18
6.3 Première démarche : rendre un matériau étirable conducteur [16]	18
6.4 Deuxième démarche : rendre un matériau conducteur étirable [17].....	21
a. Méthode kirigami	21
b. Méthode buckling.....	22
6.5 Troisième démarche : un matériau conducteur et étirable	22

.....	25
7. Développement durable.....	26
7.1 Les conducteurs.....	26
7.2 Les substrats étirables et appliqués dans le textile.....	27
7.3 Les substrats imprimables	27
8. Les applications	27
8.1 Le textile	28
8.2 La santé : médicale et pharmaceutique	30
8.3 Usage quotidien.....	32
8.4 Les panneaux solaires.....	34
8.5 Perspectives d'évolution techniques.....	35
II. RAPPORT ECONOMIQUE	36
1. Caractérisation des marchés et analyse de l'environnement économique [21][22][23][24]	36
1.1 L'électronique imprimée et l'électronique imprimée étirable.....	36
1.2 Les métaux dans les encres conductrices.....	38
2. Analyse des contextes législatifs et réglementaires.....	39
3. Diagramme Porter	41
4. Chaîne de valeur	42
III. PERSPECTIVES D'EVOLUTION	42
1. Variables essentielles	42
2. Facteurs clés de développement.....	43
3. Principaux acteurs	43
4. Matrice SWOT.....	43
5. Scénarios.....	44
<i>Scénario 1 : Optimiste</i>	44
<i>Scénario 2 : Tendanciel</i>	45
<i>Scénario 3 : Pessimiste</i>	46
CONCLUSION	47
TABLE DES FIGURES.....	48
TABLE DES TABLEAUX.....	50
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	50

INTRODUCTION

Les nouvelles technologies affluent dans le monde entier pour permettre de répondre aux différents besoins et de s'adapter à ceux déjà existants. L'électronique imprimée est un ensemble de technologies qui ont commencé à se développer dans les années 2000. Cette dernière est déjà présente dans de nombreux domaines tels que la traçabilité, les supports numériques, les capteurs ... L'alliance de l'électronique imprimée avec des matériaux déformables et étirables, capables de suivre une contrainte tout en gardant des propriétés performantes ouvre une nouvelle voie de technologie émergente et répond notamment à la volonté de créer des systèmes électroniques intelligents, portables et intégrés. Chaque individu pourrait se doter, par exemple, de son propre gilet imprimé avec de nombreux capteurs.

Les enjeux principaux de l'électronique imprimée étirable sont de conserver les performances électriques (conductivité, résistance interne ...) des dispositifs dans les états de flexion ou d'étirement, tout en empêchant une dégradation des propriétés mécaniques et physiques de ces derniers. L'électronique imprimée étirable permet une grande variété d'applications car ses composants peuvent être comprimés, tordus et peuvent ainsi convenir à des surfaces non planes complexes. Ainsi, elle convient aux applications qui nécessitent une intégration intime avec le corps humain, exigeant donc des formes curvilignes et/ou des réponses élastiques à de grandes déformations. De nombreux domaines (santé, militaire, textile ...) peuvent utiliser ce type de technologie pour faciliter l'intégration et l'adaptation des dispositifs aux contraintes des applications visées. Actuellement, l'électronique imprimée étirable se montre moins performante qu'un système non étirable. L'avancement des recherches a pour but d'accroître les performances électriques et mécaniques des systèmes étirables pour parvenir à des aptitudes équivalentes à l'électronique imprimée non étirable.

Aujourd'hui la flexibilité, c'est à dire la propriété selon laquelle un matériau souple peut être aisément courbé ou plié sans se rompre, est une propriété déjà maîtrisée en électronique imprimée. Cependant, ce n'est pas le cas de l'extensibilité, qui caractérise la propriété d'un matériau à revenir dans son état initial après avoir subi un allongement par traction. Dans notre cas, on considérera que l'électronique imprimée est étirable lorsque les propriétés physiques et électriques ne sont pas dégradées après un certain nombre de cycles d'étirement à un taux donné.

Pour tenter de répondre à ce défi, deux stratégies techniques différents peuvent être envisagés : utiliser des matériaux intrinsèquement étirables, ayant potentiellement des propriétés conductrices limitées, comme matrice de charges fonctionnelles conductrices compatibles avec ce matériau (stratégie composite), ou travailler avec des matériaux très conducteurs mais que l'on doit rendre étirables afin de ne pas perdre la percolation du réseau conducteurs sous étirement (facteur de forme, support précontraint).

Ce travail de veille se propose de faire un panorama des différentes solutions techniques, des différents matériaux ainsi que des enjeux dans le secteur de l'électronique imprimée étirable pour répondre à la question suivante :

Quelle place l'électronique imprimée étirable occupe-t-elle dans notre société et comment ses perspectives d'évolution vont-t-elles pouvoir répondre à de nombreuses ambitions techniques pour augmenter la collection de données (capteurs), mieux transmettre des informations et améliorer le quotidien ?

Ce rapport débutera avec un aspect technique. Ce début expliquera quels sont les méthodes pour fabriquer des objets étirables en électronique imprimée. Il sera illustré de différentes parties liées aux substrats, aux encres, des applications concrètes ... Ensuite, un rapport économique positionnera ce sujet dans les marchés et son environnement économique actuel. De plus, les différents outils tel la matrice SWOT, diagramme de PORTER, chaînes de valeurs et scénarios aideront à définir les produits de l'électronique imprimée étirable et leurs productions. Pour finir une conclusion reprendra les éléments importants de ce rapport.

I. RAPPORT TECHNIQUE

1. L'électronique imprimée : définition [1] [2]

L'électronique imprimée est un ensemble de technologies qui se développent depuis une vingtaine d'années. Elle consiste à réaliser des circuits électroniques entiers par impression d'encre fonctionnelle sur un substrat pouvant être souple. Elle diffère des technologies relatives à l'électronique hybride dans laquelle seules les connexions entre les composants sont imprimées sur le substrat et dont ces derniers sont fabriqués séparément puis implantés dans celui-ci.

L'électronique imprimée n'est cependant pas vouée à remplacer l'électronique conventionnelle, c'est plutôt une technologie complémentaire qui reste moins performante mais qui se distingue par :

- ✗ Un coût de production plus faible que les procédés classiques.
- ✗ Une production grande surface (productivité élevée): techniques de production utilisées pour produire des composants en grande quantité et à bas coût (production en déroulé roll to roll(R2R), ou en déroulé feuille à feuille foil to foil).
- ✗ Un plus faible impact environnemental.
- ✗ Un autre avantage, non négligeable, est que l'impression peut se faire sur un substrat flexible, ce qui ouvre de nouvelles perspectives à l'électronique.

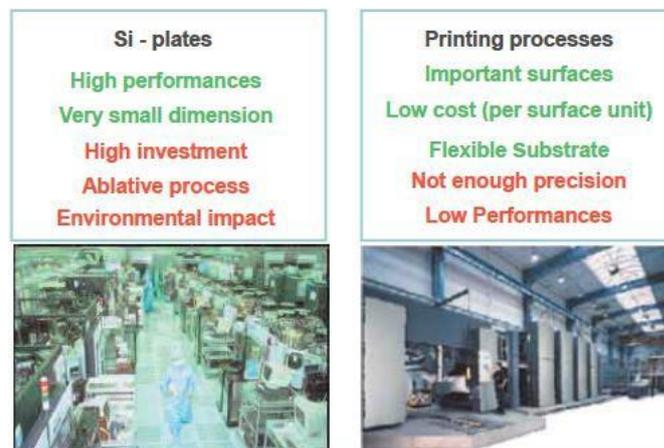


Figure 1 : Comparaison électronique traditionnelle et électronique imprimée [2]

L'enjeu principal de l'électronique imprimée est de produire des couches imprimées fonctionnelles afin de garantir des propriétés électriques homogène sur toute sa surface et afin permettre un fonctionnement optimal des composants. De ce fait, elle est soumise à de nombreuses exigences :

- ✗ Homogénéité et continuité des motifs
- ✗ Régularité des couches imprimées, résolution
- ✗ Permanence des propriétés et résistance à l'usure

- ✕ Pour impression multicouches : alignement des couches, ajustement des propriétés chimiques et physico-chimiques des encres superposées (nature des solvants, énergies de surface), conditions de séchage.

Pour répondre à ces exigences, trois éléments principaux doivent être combinés de manière optimale pour obtenir des résultats performants : le procédé d'impression, l'encre et le substrat.

2. Procédés d'impression [1] [3]

Pour garantir l'homogénéité de la conductivité du matériau sur toute sa surface, le dépôt de matériau doit être parfaitement uniforme et de nombreux éléments doivent être paramétrés : l'épaisseur du film d'encre, le type de support, la résolution, la pression, la vitesse de production.

Les procédés d'impression utilisés sont les procédés d'impression conventionnels utilisés dans l'industrie graphique, notamment : la sérigraphie, la flexographie, l'héliogravure, l'impression jet d'encre, l'offset. Ils présentent chacun des caractéristiques différentes qui leur permettent d'être plus ou moins adaptés selon les applications. Cependant, le procédé le plus utilisé à l'échelle industrielle est de loin la sérigraphie, tandis que les procédés de jet d'encre, flexographie et héliogravure sont majoritairement utilisés en recherche et développement et pour les productions pilotes. [4]

2.1 L'offset

L'offset permet une impression sur une multitude de supports (papier, carton, métal, plastiques). Cette technique permet d'obtenir une résolution excellente (15-50 μm), elle peut être réalisée à une vitesse de production assez élevée (15 à 1000 m/min) et elle permet d'imprimer recto/verso pour réaliser des circuits sur les deux faces d'un support. Cependant, le film d'encre déposé étant très fin (0,6 à 2 μm), la conductivité obtenue n'est pas très bonne c'est pourquoi il est nécessaire d'appliquer plusieurs couches pour obtenir une conductivité correcte. De plus, ce procédé nécessite une encre conductrice avec une viscosité assez élevée (10 à 100 Pa.s), ce qui n'est pas possible avec des polymères conducteurs, c'est pourquoi les encres conductrices métalliques sont généralement utilisées.

2.2 La sérigraphie

Cette technique permet de déposer un film d'encre d'une épaisseur élevée (20 à 100 μm) et de garantir une bonne conductivité sur une large gamme de supports. Malgré son excellente répétitivité, ce procédé reste lent (10 à 100 m/min) et rentable seulement pour de faibles quantités avec une faible résolution (30 à 100 μm).

2.3 Le flexographie

Il s'agit de la technique d'impression la plus prometteuse actuellement, notamment grâce à l'amélioration de la conductivité des encres utilisées. Ce procédé permet une linéature de 60 lignes par centimètre avec un cliché fin et de dureté élevée, des caractéristiques intéressantes pour l'électronique imprimée. De plus, l'épaisseur du film d'encre déposé peut atteindre 6 à 8 μm , ce qui est assez élevé (bonne conductivité). Cependant, le profil du film d'encre déposé peut créer un halo sur les bords qui va entraîner une irrégularité d'épaisseur. Les applications principales de la flexographie sont les antennes RFID (sur étiquettes, avec des encres d'argent) et les batteries imprimées.

2.4 L'héliogravure

Ce procédé permet de déposer un film d'encre assez épais (8 à 12 μm) et une impression haute résolution, ce qui le rend intéressant pour les applications dans le domaine des composants électroniques. De plus sa vitesse d'impression est intéressante puisqu'elle est assez rapide : 20 à 1000 m/min. Cependant, ce procédé présente deux inconvénients :

- ✗ Les pressions exercées lors de l'impression sont trop importantes et réduisent la compatibilité avec les supports flexibles
- ✗ Les effets de bords qui peuvent apparaître à cause de lignes droites pas assez régulières gravées lors de la fabrication du cylindre (améliorations avec l'utilisation de laser pour graver : le laser a la capacité de produire 1000 lignes par centimètre alors que la gravure électromécanique n'autorise que 100 lignes par centimètre).

2.5 Le jet d'encre

Ce procédé permet de déposer directement et uniquement la quantité d'encre nécessaire grâce à un ordinateur, sans outillage et sans contact. L'utilisation d'encres polymères est privilégiée car le risque de bouchage des buses est moins élevé, mais des encres métalliques et céramiques à base de nanoparticules peuvent être également utilisées. C'est une technique facile à mettre en œuvre, qui convient à tous types de matériaux et qui permet d'imprimer des couches superposées. Cependant, elle reste moins rapide que certaines autres techniques (1 à 100m/min) et peut poser des problèmes car le positionnement de la goutte n'est pas toujours parfait et peut causer des décalages si le procédé n'est pas maîtrisé. Le jet d'encre est donc peu utilisé à l'échelle industrielle pour des marchés de masse, mais il permet de réaliser des performances pour des marchés à haute valeur ajoutée (composants spécifiques par exemple) où il est nécessaire de fabriquer beaucoup de petites séries de composants différents.

printing process	line resolution	ink film thickness	ink viscosity	Speed [m.min ⁻¹]
Offset	15-50 μm	0,6 à 2 μm	10-100 Pa.s	15-1000
Screen printing	30-100 μm	20 à 100 μm	1-100 Pa.s	10-100
Flexography	30-80 μm	6 à 8 μm	50-500 mPa.s	50-500
Gravure	50-200 μm	8 à 12 μm	20-200 mPa.s	20-1000
Ink jet	15-100 μm	0,5 à 1 μm	1-30 mPa.s	1-100

Tableau 1 : Comparaison des différents procédés [5]

Ce tableau 1 permet de comparer de manière globale les différents procédés d'impression conventionnels.

3. Les encres [1] [3]

Les encres utilisées en électronique imprimée peuvent être divisées en deux groupes principaux : les encres métalliques et les encres organiques.

3.1 Les encres métalliques

Les encres métalliques sont des encres très conductrices (conductivité comprise entre $10 \cdot 10^6$ et $63 \cdot 10^6$ S/m comme le montre le tableau 2). Elles sont composées de petites particules métalliques (flakes, nanoparticules, nanowires, etc) telles que l'argent (le plus utilisé), le cuivre, ou encore le palladium, dans un véhicule (solvant, résine, etc.) non conducteur.

Métal	Conductivité (S/m)
Argent (Ag)	$62,5 \cdot 10^6$
Or (Au)	$41,6 \cdot 10^6$
Cuivre (Cu)	$58,8 \cdot 10^6$
Nickel (Ni)	$14,5 \cdot 10^6$
Platine (Pt)	$9,4 \cdot 10^6$
Palladium (Pd)	$9,3 \cdot 10^6$

Tableau 2 : Conductivité des métaux utilisés en électronique imprimée [6]

Les quantités, la forme, l'orientation des particules conductrices et la distribution des tailles de particules ont un effet important sur la conductivité de l'encre. Cependant, la conductivité des films imprimés avec des particules métalliques est limitée si une étape de frittage n'est pas réalisée après impression. En effet, les zones de contact entre les différentes particules sont nombreuses mais pas assez grandes en surface. Le frittage va donc permettre de chauffer le film d'encre pour que les particules coalescent et d'augmenter les surfaces de contact. Cette étape est indispensable mais influe fortement sur le choix du support : celui-ci doit être résistant à la chaleur. C'est le problème notamment pour les supports polymères qui se dégradent avec la chaleur.

L'utilisation de nanoparticules métalliques est intéressante pour diminuer ces températures de frittage. Elles sont sous forme de poudre dispersées dans un solvant organique et peuvent être utilisées pour imprimer des lignes très lisses. Ces nanoparticules ont en général une taille comprise entre 1 et 100 nm. Elles ont des points de fusion très bas par rapport aux matériaux classiques, ainsi qu'une température de frittage plus faible. Les nanoparticules les plus utilisées sont les métaux nobles tels que l'argent et l'or, car ils ont une bonne stabilité chimique et une excellente conductivité.

Le tableau 3 suivant montre que la température de fusion des nanoparticules dépend de leur taille et est toujours inférieure à celle du métal correspondant. Il faut noter que la température de coalescence des nanoparticules est inférieure en réalité à leur température de fusion.

Métal	Température de fusion du métal (°C)	Température de fusion des nanoparticules (°C)
Argent (Ag)	961	11 nm → 200 20 nm → 300 30 nm → 350
Or (Au)	1063	5 nm → 500-600
Cuivre (Cu)	1085	40 nm → 200 50 nm → 400
Nickel (Ni)	1455	10-90 nm → 900

Tableau 3 : Température de fusion des nanoparticules selon leur taille pour différents métaux [6]

La société vfp-ink-technologies développe l'encre silver electron à base de particules d'argent pour sérigraphie. [7] Tandis que les entreprises Cabot, Sun Chemical, ANP, Harima, Bayer, NanoMasn Ulvac, Applied Nanotec et UTDot produisent des encres à base de nanoparticules d'argent, pour jet d'encre et impression de substrats en polymère.[1]

Les prix de ces encres restent importants et dépendent de la taille et du type de métal des nanoparticules qui la composent. Le tableau 4 ci-dessous recense les prix proposés par quelques entreprises pour des nanoparticules d'argent.

Entreprise	Taille (nm)	Prix (US\$/kg)
Blue Nano		
SLV-NW-90 Silver Nanowires	90±20 nm	4 950
SLV-NP-100 Silver Nanospheres	100±10 nm	3 490
NaBond Technologies Co., Ltd.	< 60	160
Inframat	50-80	179
SkySpring Nanomaterials, Inc	40	472
Sigma-Aldrich	< 50	3 200
Sun Innovations	25	18 000
Plasmachem GmbH	40	4 500

Tableau 4 : Prix des nanoparticules d'argent selon leur taille et l'entreprise les produisant [8]

En ce qui concerne les encres à base de cuivre, les prix sont plus faibles : 438 \$/kg pour des nanoparticules (diamètre 5 à 7 nm), mais ce métal s'oxyde bien plus facilement que l'argent, même si sa conductivité est proche de celle de ce dernier (cf tableau 2).

3.2 Les encres organiques

Les encres organiques peuvent se classer en deux grandes familles principales : les encres à base de polymères conducteurs organiques et les encres à particules de carbone.

a. Les encres à bases de polymères conducteurs organiques

Ce sont des encres semi-conductrices constituées de polymères tels que le polythiophène (PEDOT:PSS), le polyaniline (PANI) ou le polypyrrole (PP). Ils sont plutôt utilisés pour les transistors. Les

semi-conducteurs sont des matériaux qui ont les caractéristiques des isolants mais pour lesquels la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante. Ils ont une conductivité électrique intermédiaire entre celle des métaux et des isolants (voir tableau 5 ci-dessous pour les valeurs de conductivités). Ainsi, les semi-conducteurs sont des isolants qui peuvent devenir conducteurs lorsque leurs électrons de valence sont excités (par chauffage, éclairage ...). [1]

La société Finlandaise Panipol commercialise des encres polyaniline à base de solvants ou d'eau. Tandis que les sociétés TDA et Bayer AG produisent du PEDOT/PSS (commercialisé sous la forme d'une dispersion aqueuse stabilisée par un contre ion). [9]

Un autre polymère est fortement utilisé, il s'agit d'un dérivé du polythiophène, le polyéthylènedioxythiophène ou PEDOT/PSS. Ce polymère dopé est commercialisé sous la forme d'une dispersion aqueuse qui est stabilisée par un contre ion. Il prend le nom commercial d'Aedotron, d'Oligotron ou de Baytron chez TDA et Bayer AG. [3]

Composant	Nom commercial	Fabricant	Conductivité
Polyaniline	Panipol	Panipol, Zipperling	100 S/cm
Polythiophene (PEDOT/PSS)	Baytron P	Bayer AG, AGFA	1-10 S/cm
Polypyrrole	Conquest	DSM	1 S/cm

Tableau 5 : Conductivité de certains polymères [9]

Ces polymères ont notamment pour avantages :

- ✗ Un prix faible comparé aux métaux (170€ les 100mL) [10]
- ✗ Une flexibilité intéressante pour impression sur support souple
- ✗ Une masse spécifique faible (environ 1000kg/m³ contre 10000 à 20000kg/m³ pour les métaux).

Cependant :

- ✗ Ils possèdent une forte résistivité (1020 Ω.m contre 10⁻⁹ Ω.m pour les encres à base métaux): ils sont donc beaucoup moins conducteurs
- ✗ Ils se dégradent plus rapidement au contact d'UV, de température ou d'humidité élevée.

Il est aussi possible de formuler des encres semi-conductrices à parti de nanocristaux ou des nanofibrilles de cellulose.

b. Les encres à case de particules de carbone

Les premières encres conductrices utilisées étaient des encres à base de graphite, commercialisées par Flint Ink (USA) ou SICPA notamment. Leurs conductivités n'étant pas très bonnes, des encres à base de Graphène, de noir de carbone et surtout de nanotubes de carbone ont vu le jour.

Les nanotubes de carbone sont de plus en plus utilisés pour la formulation d'encre. Ces macromolécules de carbone pur sont longues (100 nm à quelques mm), fines (diamètre de 0,6 nm à quelques nm) et aussi ordonnées que des cristaux.

Ces nanotubes ont pour avantages :

- ✗ Leur élasticité élevée (à l'inverse des métaux), ce qui permet donc une impression sur supports flexibles et extensibles.
- ✗ Leur bonne conductivité (supérieure à celle du cuivre $59,6 \times 10^6$ S/m)
- ✗ Leur résistance et leur stabilité thermique élevées : module d'Young élevé, supérieur à 1 TPa et contrainte à la rupture de 45 GPa contre 2 GPa pour l'acier et 3,5 GPa pour le Kevlar. Ils sont stables jusqu'à 28000 °C sous vide, 750 °C à l'air. [11]
- ✗ De ne pas nécessiter de recuit.

Cependant, malgré leurs nombreux avantages, ils demeurent très chers (168 000\$/kg) et difficiles à disperser en solution.

Un des fournisseurs principaux de ce type d'encre est la société Poly-ink, avec son encre Poly-Ink HC à base de nanotubes de carbone et de polymère conducteur qui permet d'obtenir des films flexibles avec un haut niveau de transparence et de conductivité électrique. [12]

3.5 Les oxydes transparents conducteurs

Les TCO sont des oxydes métalliques dopés utilisés dans les dispositifs optoélectroniques tels que les écrans plats et le photovoltaïque. Les TCO les plus utilisés actuellement sont SnO₂, InO₃, ZnO et l'oxyde d'indium-étain (ITO : Indium Tin Oxide). Ce dernier est le plus performant en termes de conductivité et de transparence (conductivité d'environ 10^4 S/cm, facteur de transmission lumineuse : de 75 à 90% pour une épaisseur allant de 0,5 à 6 mm). Il est sous forme solide, et composé de 90% d'oxyde d'indium (III) (In₂O₃) et de 10% d'oxyde d'étain (IV) (SnO₂).

Cependant, l'ITO pose des problèmes au niveau environnemental car son recyclage reste difficile et coûteux.

Le leader mondial dans la production d'ITO est Indium Corporation. [10]

4. Les substrats [13] [14]

Le choix du substrat est une étape très importante, ce dernier doit être souple, présenter une bonne stabilité dimensionnelle, résister à des pressions importantes lors de l'impression, résister à de fortes températures (pour le recuit). Son état de surface est également un paramètre très important à prendre en compte : le support doit être plus ou moins poreux (dans le cas du papier) afin que l'encre

puisse pénétrer partiellement dans le matériau et adhérer à celui-ci. Cependant, si l'encre pénètre trop, une discontinuité et une perte de conductivité apparaîtra. Dans le cas des supports en polymères, dits "fermés", une bonne mouillabilité aux encres est nécessaire : la tension de surface du liquide doit être inférieure à l'énergie de surface du solide. La rugosité et la porosité sont à prendre en compte pour éviter les discontinuités dans les lignes conductrices. Pour finir, le support doit être isolant et neutre d'un point de vue électrique afin de ne pas interagir avec les matériaux déposés.

Ainsi, de nombreux substrats peuvent être utilisés dans le cadre de l'électronique imprimée : des films polymères, du verre, du carton, du papier, de la céramique... Ils peuvent être utilisés sous forme rigide ou flexible, en bobine ou en feuille.

Cependant, les deux types de substrats les plus utilisés sont les substrats en polymères et en papier. L'utilisation du papier comme substrat nécessite un traitement pour obtenir des caractéristiques physiques propre à l'impression de circuit électrique. Ces matériaux sont utilisés en fonction des contraintes d'utilisations et du résultat recherché.

4.1 Les substrats en polymère

Les substrats les plus utilisés pour des formulations avec les solvants de plus hautes températures de séchage sont le PET (PolyEthylène Téréphtalate) (comme le montre la figure 2), le PEN (PolyEthylèneNaphtalate) et le Polyamide. Ils possèdent de nombreux avantages tels que leur flexibilité, leurs bonnes propriétés mécaniques (module de tension de l'ordre de 2GPa pour le PET, 5,5 GPa pour le PEN), leur faible capacité à absorber l'humidité et leur résistance aux solvants (très utilisés en électronique imprimée). En revanche, ce type de substrat possède des problèmes de résistance au frittage comme le recuit (température de transition vitreuse : 70°C pour le PET et 90°C pour le polyamide).

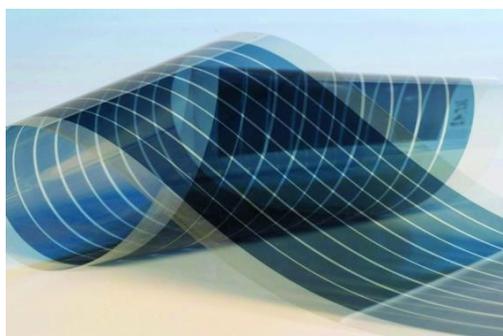


Figure 2 : Substrat en polymère (PET)

4.2 Les substrats en papier

Les substrats en papier sont quant à eux utilisés dans les applications de grande consommation telles que les tickets de transport hors contact.

De manière générale, papier non traité n'est pas bien adapté à l'électronique imprimée : il possède une porosité et une rugosité trop importantes ainsi qu'une faible stabilité dimensionnelle (variations d'épaisseur et de largeur) ce qui peut entraîner des discontinuités dans les lignes imprimées. C'est pourquoi, pour être utilisé en électronique, le papier est traité afin d'améliorer ses propriétés et limiter

les défauts cités, même si ses propriétés mécaniques sont moins bonnes et qu'il est moins résistant aux fortes températures et à l'humidité que les polymères.

Ce type de substrat est intéressant car il possède quelques avantages comparé aux substrats en polymères :

- ✗ Faible coût du papier
- ✗ Recyclabilité
- ✗ Fabrication à partir de matériaux renouvelables (fabrication de papier à partir de papier recyclé, gestion des forêts de manière durable)
- ✗ Vitesse des procédés d'impression.

Il est donc utilisé comme un substrat low-cost et flexible pour l'électronique imprimée.

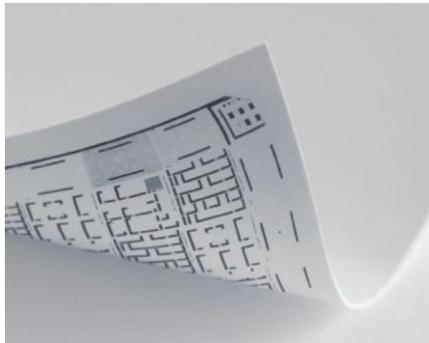


Figure 3 : Substrat en papier (110 g/m²)

5. Application générales [14] [15]

Aujourd'hui, les applications de l'électronique imprimée sont nombreuses. Cette dernière connaît notamment deux domaines d'application majeurs : le domaine de l'intelligence imprimée et la gestion de l'énergie.

Les applications dans le domaine de l'intelligence imprimée sont larges : Capteurs, Identification/Authentification, Affichages (OLEDs), Eclairage, Circuit/Connexion

5.1 Les capteurs

Les capteurs sont des dispositifs intelligents qui permettent de communiquer une information. Leurs couches organiques peuvent être sensibles à différents stimuli, on trouve donc différents types de capteurs : dépression, capacitifs, piézorésistifs, biocapteurs, optiques, de température, de gaz...



Figure 4 : Capteur piézorésistif pour la marche et course à pieds

La figure 4 montre un exemple de capteurs. Cette semelle intérieure de chaussures développées par Quad Industries avec la société allemande Medilogic. Elle permet d'enregistrer la pression sous le pied sans fil. La société a utilisé des encres d'argent et de carbone imprimée en sérigraphie.

5.2 Les OLEDs

Les diodes électroluminescentes organiques (OLEDs) sont une technologie d'affichage qui repose sur le phénomène d'électroluminescence. Ces diodes peuvent être imprimées sur des supports rigides ou flexibles.

La technologie OLED se base 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 fonctionnement est explicité par la figure suivante :

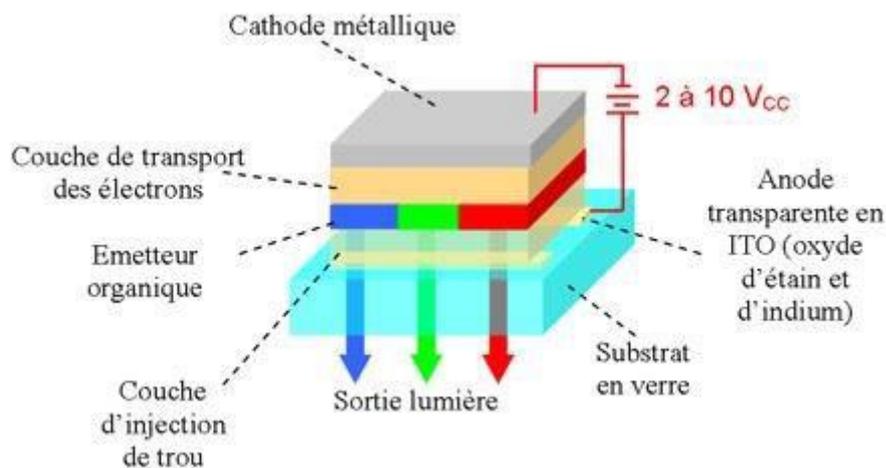


Figure 5 : Fonctionnement d'une OLED

5.3 La RFID

La RFID (Radio Frequency Identification) est basée sur l'émission d'un champ électromagnétique par un "lecteur" ou "élément fixe" qui est reçu par l'antenne d'une ou plusieurs étiquettes.

Le principe de fonctionnement d'un système RFID est basé sur deux éléments :

- ✗ Un tag ou transpondeur: étiquette intelligente encapsulée ou collée sur un produit afin de l'identifier. Il est composé d'une antenne et parfois d'une puce. Il peut gérer les données à l'aide d'un circuit intégré (puce). Il existe 3 types de tag : passif (puissance émise par le lecteur

sert à la fois pour alimenter le tag et répondre au lecteur), actif (une source d'énergie est embarquée sur le tag pour l'alimentation et la communication descendante), semi passif (combinaison des deux types).

- ✗ Un lecteur RFID (figure 6) : interface entre une application logicielle et les tags RFID. Il permet de gérer la communication avec les tags et de transmettre les informations à l'application logicielle.



Figure 6 : Tag RFID

5.4 La gestion de l'énergie

Les applications de ce domaine sont notamment :

- ✗ Les batteries
- ✗ Les cellules photovoltaïques
- ✗ Les piles à combustible
- ✗ La conversion d'énergie (chaleur, mouvement...).

Leur utilisation reste limitée (patchs médicaux par exemple), car elles sont minces et très souples mais coûtent plus cher que la plupart des piles boutons classiques. Cependant, des batteries (piles rechargeables) imprimées commencent à apparaître et pourraient être utilisées pour alimenter la plupart des applications imprimées. Notamment, la société Enfucell a lancé sur le marché en 2007 la Soft Battery (figure7). Cette pile permet de délivrer une tension de 1,5 à 3 volts et a une épaisseur de seulement 0,4 mm et de dimensions 5x5cm². Elle est donc intégrable facilement dans de nombreux dispositifs.



Figure 7 : Batterie Enfucell par la société SoftBattery

6. L'électronique imprimée étirable

L'électronique imprimée étirable est très intéressante dans le développement de l'électronique imprimée. En effet, la fonction étirable de ces nouvelles impressions électroniques permettra l'innovation d'une multitude de nouveaux produits et applications puisque les éléments électroniques pourront correspondre à tous types de géométrie et pourront donc être utilisés dans plusieurs domaines.

6.1 Matériaux utilisés

Les explications techniques à venir font référence à plusieurs matériaux pouvant ne pas être bien connus, c'est pourquoi une liste détaillée de tous les matériaux cités est nécessaire.

Les matériaux cités dans les différentes démarches sont :

- ✗ Dupolyester spandex. Le polyester (figure 8) est un polymère synthétique issue de la pétrochimie, très utilisée dans le domaine du textile qui présente l'avantage de résister aux frottements. Le Spandex est un élastomère ayant une importante élasticité et la capacité de revenir à sa forme initiale après étirement. D'ailleurs, le mot « spandex » provient de « expandable ».

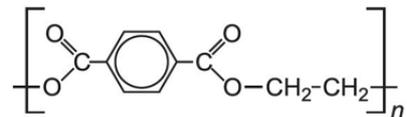


Figure 8 : Représentation chimique commune du polyester

- ✗ De la fibre PDMS (figure 9) dopée par colorant. PDMS signifie poly-diméthyl-siloxane, ses liaisons siloxanes permettent d'obtenir une chaîne de polymère flexible avec un haut niveau de viscoélasticité, c'est un polymère déformable. Le fait de doper par colorant permet de détecter lorsque le matériau est déformé et d'approcher du point de rupture puisqu'il change de couleur dans ce cas.

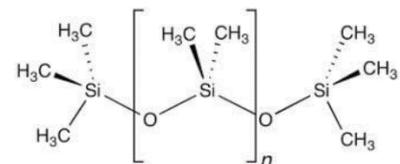


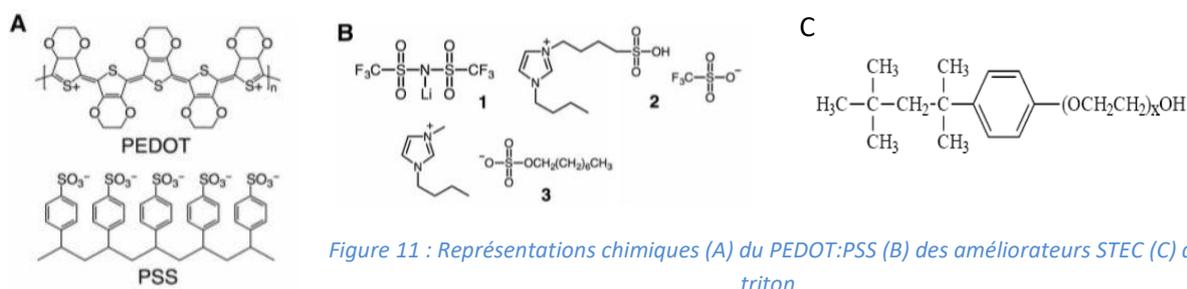
Figure 9 : Représentation chimique du PDMS

- ✗ Des couches de passivation et des nanofils d'argent. La passivation est un état des métaux tel que leur vitesse de corrosion est ralentie par la présence d'un film passif naturel ou artificiel, par rapport à ce qu'elle serait en l'absence de ce film. Il apparaît spontanément par oxydation, parce que l'oxyde formé sur la surface est insoluble et constitue un obstacle. Les nanofils d'argent (AgNW) ont la particularité d'être de bons conducteurs sans oxyder comme le cuivre au contact de formes aqueuses.
- ✗ Les nanotubes de carbone (CNT, figure 10) et le graphène sont aussi des matériaux conducteurs. Les CNT ont la particularité d'être très résistants et légers.



Figure 10 : Représentation des CNT

- ✗ Le polymère conducteur souvent utilisé est le PEDOT:PSS, il présente des particularités décrites dans la suite. On ajoute à ce polymère des additifs ioniques (STEC) et le triton comme plastifiant dans le but d'augmenter l'extensibilité du PEDOT:PSS.



6.2 Propriétés et mesures mises en jeu

Les **propriétés conductrices** d'un matériau conducteur peuvent s'évaluer par la mesure de deux grandeurs :

- ✗ La résistivité électrique ρ (Ohm.m) telle que $R = \rho * L / S$ avec R la résistance du conducteur (Ohm), L la longueur du conducteur (m), S la section du conducteur (m^2)
- ✗ La résistance par carré $R_{carré}$ (Ohm/sq) telle que $R_{carré} = \rho / w$ avec w l'épaisseur du matériau (m). Le dispositif utilise 4 pointes dont 2 pointes externes imposant un courant et 2 autres pointes mesurant la tension, les pointes sont généralement espacées de 1 mm et sont très fines.

L'étirabilité d'un matériau est testée par traction. En effet, le principe de ce test est d'étirer un bout du matériau représenté par un **pourcentage de déformation** et de mesurer jusqu'à quel pourcentage le matériau est capable de revenir à son état mécanique initial. Les matériaux subissant de la fatigue mécanique, il sera également mesuré l'évolution du pourcentage de déformation (ou le taux d'étirement) en fonction d'un nombre de cycles d'étirements.

Comme énoncé dans l'introduction, allier des propriétés conductrices et d'extensibilité pour un même matériau est très compliqué. Alors, il existe deux manières de faire, présentées successivement dans les paragraphes suivants. Le dernier paragraphe décrira l'expérimentation d'un matériau alliant les deux propriétés.

6.3 Première démarche : rendre un matériau étirable conducteur [16]

La première méthode consiste à utiliser un **matériau intrinsèquement étirable**, ayant donc des propriétés conductrices limitées, et d'y **ajouter des éléments conducteurs** compatibles avec ce matériau. Parmi les matériaux cités précédemment, le polyester spandex et le PDMS sont des matériaux étirables, les nanofils d'argent, le graphène et les nanotubes de carbone sont des éléments conducteurs.

Dans des laboratoires américains, Jae Sang Heo et ses collaborateurs, ont publié une étude en début 2020 dans le Journal IEEE Sensors, dans laquelle est étudiée la question d'un textile étirable avec des capteurs incorporés. Nous allons donc, à travers cette étude, nous intéresser aux expériences et

aux résultats concernant la fabrication d'un capteur conducteur et étirable à partir d'un matériau seulement étirable.

Pour ce faire, ils ont utilisé le polyester spandex en tant que substrat (80% de polyester et de 20% de spandex), un capteur utilisant une fibre PDMS dopée par colorant et des couches de passivation et des électrodes de nano-fils d'argent AgNW pour la conductivité.

La fabrication de l'unité du capteur à base textile suit les étapes schématisées par la figure 12 ci-dessous :

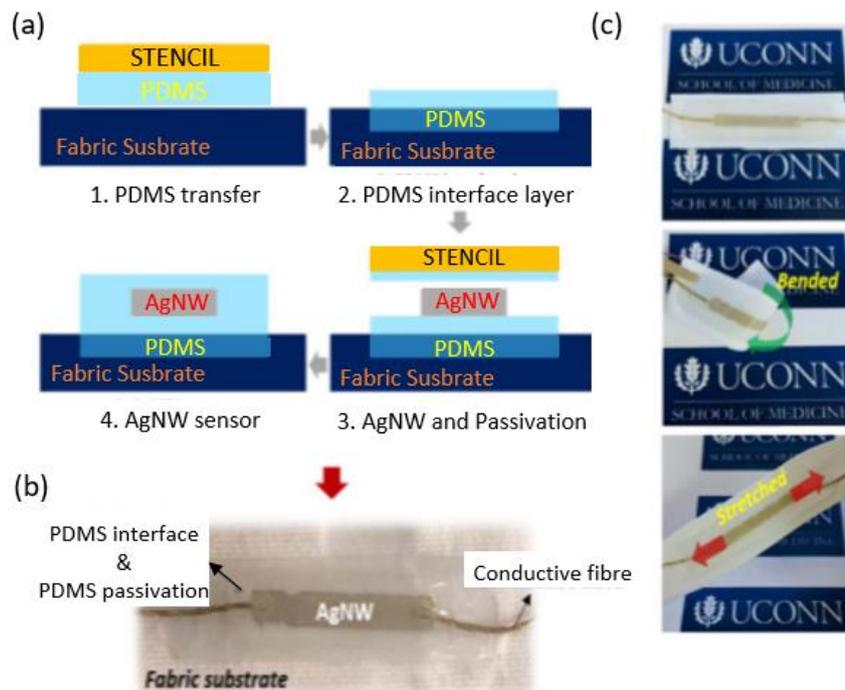


Figure 12 : (a) schéma du process de fabrication du capteur d'AgNW avec l'interface PDMS et les couches de passivation. (b) le capteur intégré au textile. (c) le capteur original (haut), le courbé (milieu) et l'étiré (bas)

Le PDMS est transféré au tissu par sérigraphie puis recuit. Une fois que le PDMS a été transféré, les AgNW ont été enrobés dans la couche interface de PDMS en utilisant la méthode de drop-coating (enrobage goutte à goutte). Des interconnecteurs électriques ont ainsi été formés en utilisant un conducteur fort en fil argenté ($R_{\text{carré}} < 0,0025 \text{ ohm/sq.cm}$, 0,2 mm de diamètre) et une pâte en argent. Après ça, la couche de passivation en PDMS a été transférée pour prévenir la délamination du film de AgNW.

Le capteur ainsi fabriqué est étirable et pliable grâce à la bonne déformabilité du PDMS et du tissu.

Maintenant que nous connaissons la première méthode pour rendre un matériau étirable conducteur, nous allons en commenter les performances via la figure 13 ci-dessous.

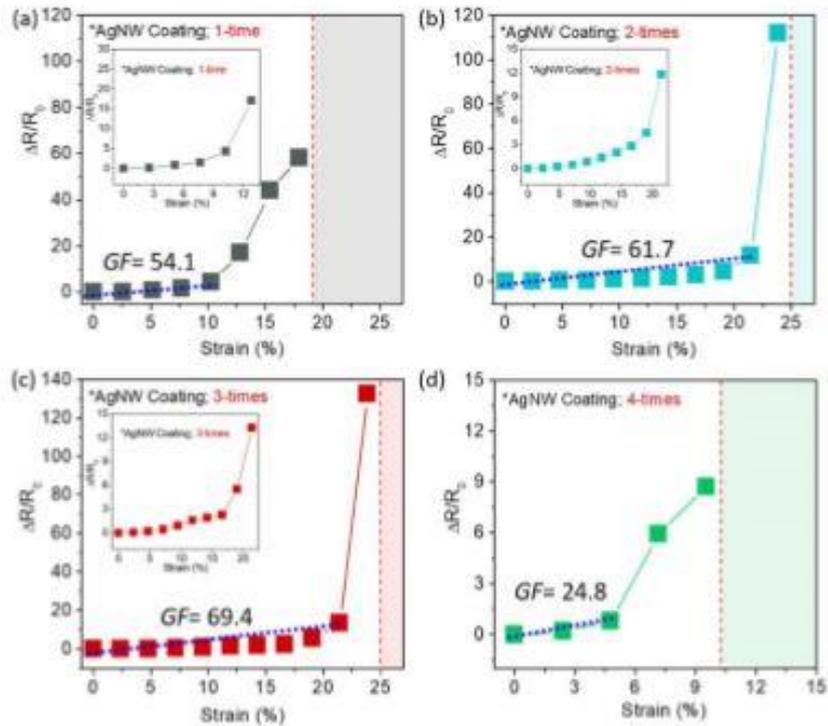


Figure 13 : Caractéristiques électriques du capteur d'AgNW face aux contraintes de déformation suivant différents nombres d'enrobages d'AgNW : (a) 1-time, (b) 2-times, (c) 3-times, (d) 4-times.

Concernant la variation relative de la résistance de ce matériau face à une contrainte de déformation appliquée en fonction de différents nombres d'enrobages du film d'AgNW, on constate que plus on augmente le nombre d'enrobages (2 ou 3), plus on améliore la stabilité. Le multi-coating améliore aussi la fiabilité mécanique et la sensibilité de l'AgNW. Néanmoins, il est nécessaire de contrôler l'épaisseur de film d'AgNW.

Afin d'aller plus en profondeur sur ce dernier point, les chercheurs ont également réalisés des tests concernant la caractérisation structurelle de l'AgNW en étudiant l'évolution de l'épaisseur du film d'AgNW en fonction du nombre d'enrobages présentés sur la figure 14.

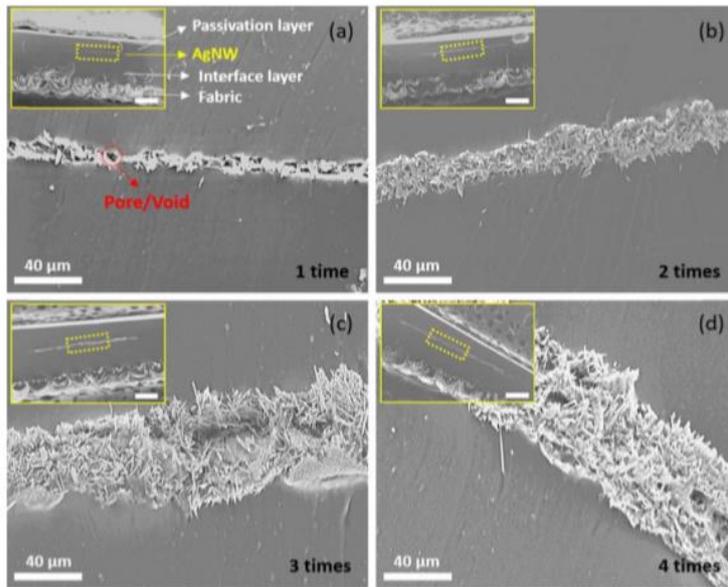


Figure 14 : Caractéristiques structurales des films d'AgNW et épaisseur du film suivant le nombre d'enrobage : (a) 1-time : 7 μm , (b) 2-times : 20 μm , (c) 3-times : 43 μm , (d) 4-times : 53 μm

Alors, avec le 2-time coating, l'épaisseur du film croît de 7 μm à 20 μm et la structure devient plus uniforme, couvrant ainsi les pores, ce qui améliore la stabilité et la fiabilité de la réponse résistive jusqu'à 25% de déformation. Concernant le 4-time coating, l'épaisseur de seuil étant dépassée, l'influence mécanique extérieure est plus importante, ce qui donne une faible fiabilité et stabilité mécanique.

En conclusion à cette première étude, plusieurs autres expériences ont été menées comme la réponse du capteur à la résistance face à des plis ou sa résistance à l'eau. Les résultats trouvés concernant l'étude de plusieurs caractéristiques en fonction du nombre d'enrobage convergent vers une même conclusion : le nombre d'enrobage du film d'AgNW influe sur les performances conductrices du matériau et le meilleur nombre d'enrobage est 2 ou 3.

6.4 Deuxième démarche : rendre un matériau conducteur étirable [17]

Une autre étude, menée par Yue Wang et ses nombreux collaborateurs au *SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park USA*, a été publiée en 2017 dans *Science Advances* et traite d'un polymère conducteur, transparent et hautement étirable, ce qui nous intéressera dans la prochaine partie.

Ici, deux approches sont évoquées par ces chercheurs et permettent d'utiliser des **matériaux non étirables mais conducteurs et de les rendre étirables**. Ces méthodes sont particulièrement décrites dans un article écrit par Wei Wu en 2019 publié dans *Science and Technology of Advanced Materials*[8].

a. Méthode kirigami

Dans la première approche, les matériaux inorganiques non étirables comme le métal sont géométriquement dessinés dans des lignes ondulées pouvant être étendues lorsque l'élastomère en dessous est étirable. C'est la méthode « kirigami ». Dans la culture asiatique, le kirigami est une combinaison de pliage et de coupe. Ainsi, la méthode kirigami permet de transformer un substrat inextensible en substrat très résistant comme un ressort mécanique en ajoutant des coupes parallèles

et en les divisant en un réseau de fines lamelles avec de courtes connexions transversales. Par rapport à la feuille souple initiale sans coupure de ligne, la feuille de kirigami présente une déformation mécanique hors plan et la feuille est très extensible. Par exemple, la méthode de fabrication kirigami a été utilisée pour créer des batteries et a significativement augmenté l'étirabilité (plus de 150% de déformation).

b. Méthode buckling

Dans la deuxième approche, il est possible de déposer une fine couche de matériaux conducteur (métal, nanotubes de carbone, graphène) sur un substrat précontraint, menant à la formation périodique de boucles à la fin de la déformation, ce qui permet au matériau de s'adapter à de nouveaux cycles d'étirement jusqu'à la valeur initiale. C'est la méthode « buckling » ou MBM « Mechanical Buckling Method » schématisée par la figure 15.

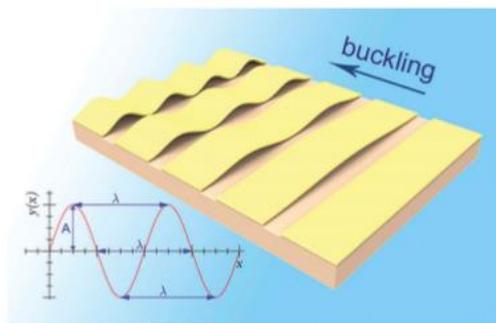


Figure 15 : Schéma du film MBM sur un substrat, formant des structures ondulées avec différentes amplitudes et longueurs d'ondes.

La longueur d'onde (λ) et l'amplitude de crête (A) sont des facteurs clés pour la capacité de déformation et les propriétés électroniques des dispositifs finaux. Étant donné que les valeurs λ et A peuvent être déterminées, l'extensibilité et la compressibilité des systèmes de bouclage peuvent être calculées faisant intervenir la valeur de précontrainte appliquée, la déformation minimale requise pour générer l'ondulation, l'épaisseur de la couche rigide et le module de déformation planaire (par rapport au plan) du substrat et du film.

Généralement, les matériaux semi-conducteurs cassants et les métaux sont transformés en forme ondulée via le MBM pour obtenir une extensibilité.

Ces deux méthodes montrent qu'il est possible de virtuellement transformer n'importe quel matériau rigide en un matériau étirable en maintenant leurs propriétés électriques.

6.5 Troisième démarche : un matériau conducteur et étirable

La suite de l'étude de Yue Wang et ses collaborateurs porte sur la recherche d'un matériau pouvant être directement à la fois conducteur et étirable dès l'utilisation, ne nécessitant donc plus de transformation.

Pour ce faire, les polymères conducteurs sont de bons candidats. En effet, pour obtenir un matériau très conducteur et étirable, il faut un conducteur intrinsèquement étirable et les polymères conducteurs sont flexibles dans le réglage des structures moléculaires et des propriétés électriques et

mécaniques. Mais une haute conductivité et une haute étirabilité n'ont pas encore été rendus possibles en ce qui concerne les polymères conducteurs.

Par exemple, le PEDOT:PSS (cf 6.1) est connu pour avoir la plus grande conductivité parmi les polymères mais il connaît une rupture de déformation autour de 5%, ce qui est trop faible. Des recherches ont montré que le PEDOT:PSS peut être étirable en incorporant un plastifiant comme le triton.

Alors, la meilleure valeur rapportée est 550 S/cm à 0% de déformation et une conductivité de 13 S/cm en-dessous de la rupture à 188%. Ces matériaux sont utilisés comme capteurs de pression ou de déformation mais ne sont pas efficaces dans l'interconnectivité.

L'interconnectivité de divers composants électriques rigides requiert un polymère conducteur intrinsèquement étirable avec une conductivité > 1000 S/cm à une déformation >100% et un minimum de dépendance de température.

La suite explicite une méthode découverte par WANG afin de créer un film PEDOT hautement étirable et conducteur avec une forte stabilité cyclique en incorporant des amplificateurs d'extensibilité et de conductivité électrique assistés par des additifs ioniques (STEC).

Pour un essai typique, le STEC a été dispersé de manière aqueuse dans le PEDOT:PSS de 10 à 71 % en masse. Des films épais ont été acquis en séchant le mélange pendant une nuit dans un moule en téflon puis en recuisant et des films minces ont été traités par centrifugation à 1000 tr/min puis recuits.

a. Sélection d'améliorateurs STEC

Dans le but d'obtenir un polymère hautement performant, des études ont été menées afin de sélectionner le ou les meilleurs améliorateurs STEC.

Les améliorateurs STEC ont besoin de ramollir partiellement les chaînes polymères pour créer des domaines mous afin d'obtenir une contrainte de rupture élevée. Pour promouvoir une conductivité élevée, il est important d'avoir une bonne connectivité entre les domaines riches en PEDOT, ce qui nécessite une interaction électrostatique affaiblie entre PEDOT et PSS. Ceci permettra au PEDOT d'agréger partiellement pour former un réseau conducteur dur à l'intérieur d'une matrice PSS souple, comme schématisé sur la figure 16 ci-dessous.

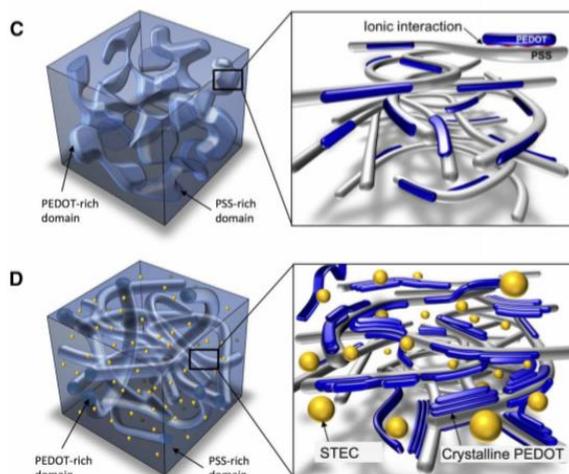
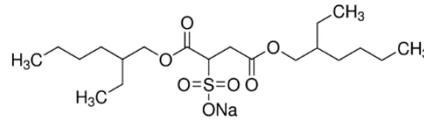


Figure 16 : Représentation schématique (C) de la morphologie typique du film de PEDOT:PSS et (D) du film étirable de PEDOT:PSS avec les STEC

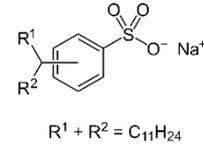
Être conducteur et étirable nécessite deux caractéristiques principales pour les STEC : une bonne solubilité dans l'eau et dans la matrice de PEDOT:PSS et des anions fortement acides agissant comme dopants.

Voici la liste des différents améliorateurs STEC efficaces :

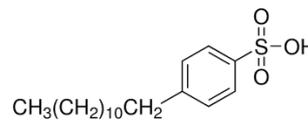
- ✗ Sel de sodium dioctylsulfosuccinate



- ✗ Dodecylbenzene sulfonate de sodium



- ✗ Acide dodecylbenzenesulfonique



- ✗ Liquides ioniques

Figure 17 : Formules chimiques du sel de sodium dioctylsulfosuccinate (haut), du dodecylbenzenesulfonate de sodium (milieu) et de l'acide dodecylbenzenesulfonique (bas)

Ces composant réduisent le module d'Young, rendent le PEDOT:PSS très extensible et préservent ou augmentent la conductivité.

b. Etude du film de PEDOT sur des substrats élastiques

L'étirabilité du PEDOT se caractérise en utilisant de fins films directement enrobés sur des substrats élastiques SEBS afin d'évaluer leur comportement électrique, voir la figure 18.

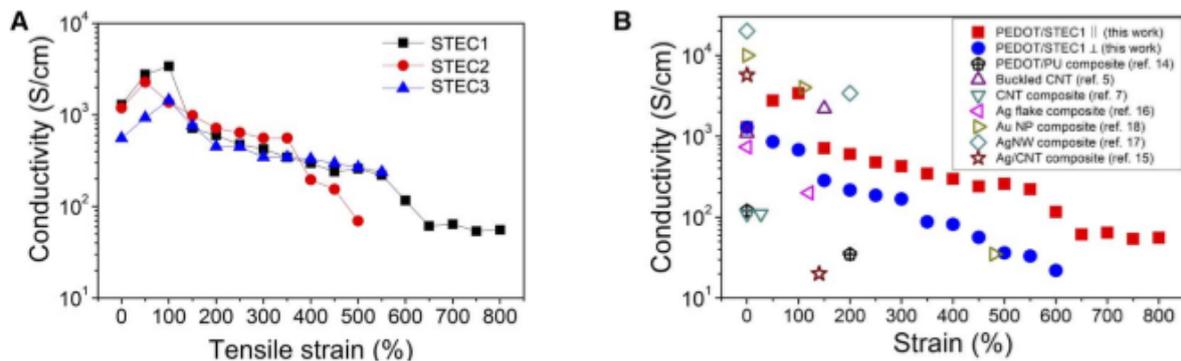


Figure 18 : (A) conductivité face aux déformations du PEDOT suivant les STEC, (B) conductivité face aux déformations du PEDOT comparé aux conducteurs connus de la littérature

Lors de l'étirement, une augmentation initiale de conductivité de près de 3 fois jusqu'à 3390 S/cm en-dessous de 100% de déformation sont observés le long de l'étirement parallèle, mais ceci décroît dans la direction perpendiculaire (figure B). L'améliorateur STEC N°1 présente les meilleurs résultats car la conductivité est supérieure à 1000 S/cm entre 0% et 100% de déformation avec une plus haute valeur de 3390 S/cm sous 100% et obtient une conductivité de 100 S/cm à 600% et de 56 S/cm à 800% de déformation (figure A).

De plus, les films de PEDOT étirables ont une haute stabilité cyclique, démontrée sur la figure 19.

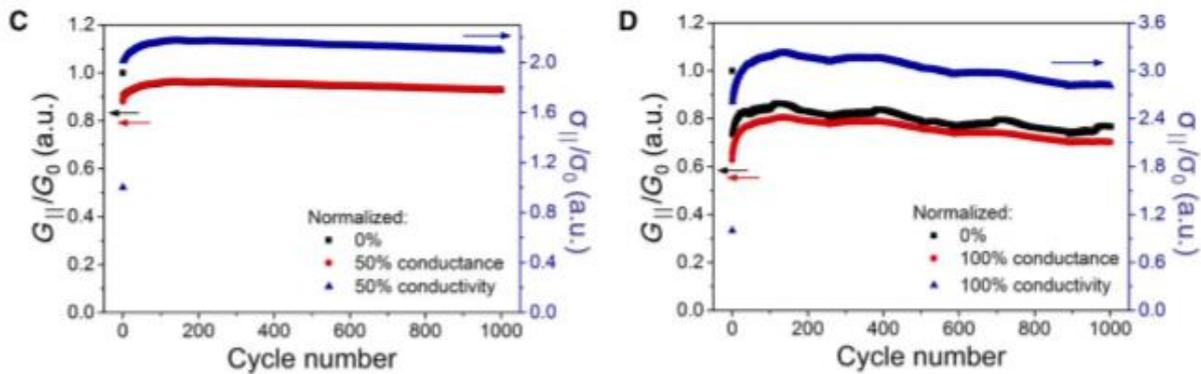


Figure 19 : Stabilité cyclique du PEDOT/STEC sous (C) 50% de déformation et (D) 100% de déformation

Après 1000 cycles, la conductance G du film, représentant la variation de résistance, redonne 92% de la valeur d'origine en dessous de 50% de déformation et 71% sous 100% de déformation.

c. Caractérisations morphologiques du PEDOT

L'addition de STEC au PEDOT augmente sa cristallinité. Il est probable que les molécules de STEC résident principalement dans les régions les plus désordonnées, ce qui adoucit davantage le matériau. Cela donne naissance à un réseau de nanofibres intégré dans une matrice souple, qui est une morphologie souhaitable pour une extensibilité élevée. Cette morphologie est aussi avantageuse pour une conductivité élevée du fait de la haute cristallinité du PEDOT, et améliore la connectivité.

La figure 20 montre que la conductivité du PEDOT/STEC augmente rapidement quand la concentration de STEC augmente jusqu'à 45% en poids.

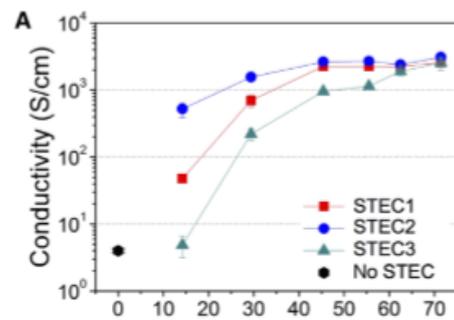


Figure 20 : Conductivité des films de PEDOT en fonction des pourcentages en masse de STEC introduits et suivant différents STEC

Pour conclure sur cette démarche, le résultat obtenu est un matériau conducteur et étirable avec une conductivité de 4100 S/cm en dessous de 100% de déformation avec une stabilité cyclique. Ainsi sont obtenues des matrices de transistors jusqu'à 5 fois plus élevées dans l'interconnectivité par rapport à celles utilisant des interconnexions métalliques ondulées (méthode kirigami).

7. Développement durable

L'industrie de l'électronique imprimée étirable étant à ses débuts, il est extrêmement difficile de trouver des articles se focalisant sur le recyclage total de ces produits. Le recyclage de chaque constituant de l'électronique imprimée étirable sera alors séparément étudié.

7.1 Les conducteurs

Voici une liste de différents conducteurs :

- ✗ Métal
- ✗ Nanotubes de carbone(CNT)
- ✗ Graphène
- ✗ Nano fils d'argent(AgNW)
- ✗ Polyaniline(PANI)
- ✗ Polypyrrole(PP)
- ✗ PEDOT:PSS (également étirable avec incorporation d'un plastifiant comme le zonyl ou le triton)

Ces conducteurs sont utilisés par le secteur de l'électronique par l'industrie chimique, l'industrie médicale et l'industrie textile sous-forme de nanoparticules. Une question vient alors à l'esprit : **comment peut-on recycler un objet connecté et récupérer séparément ces différents matériaux?**

Le recyclage reste complexe car les objets renferment plusieurs matériaux différents, qu'ils soient naturels ou artificiels. De plus, la présence d'électronique (résistance, capacité, transistors, inverseurs, portes logiques ...) complexifie encore la donne.

Il est possible d'enlever l'électronique pur, notamment les batteries ou les piles, les capteurs et le microprocesseur pour au moins récupérer le cuivre et les métaux rares.

Pour le textile, en revanche, une fois que le fil est intégré, il est très difficilement récupérable. Le temps passé pour détricoter un textile et pour aller chercher les quelques fils conducteurs qui n'auraient pas beaucoup de poids n'intéresse que très peu les industriels. En effet, le rapport temps de travail et gain pour l'entreprise n'est pas avantageux.

Pour développer le recyclage, il faudrait miser sur l'éco-conception. Malheureusement, ces questions restent encore peu développées dans les start-ups mais tendent à s'accroître.

Les nouvelles technologies ne vont pas forcément simplifier le problème, car les matériaux sont de plus en plus complexes. Lorsque les capteurs et les différents composants sont directement imprimés sur les textiles ou intégrés aux fibres, ils font partie intégrante du textile.

7.2 Les substrats étirables et appliqués dans le textile

Les substrats étirables sont : les films de PEDOT:PSS (également conducteur) et le SEBS.

Les substrats utilisés pour le textile sont : le coton, la soie, le lin, le polyester et le spandex.

Concernant les fibres, 63% des fibres utilisées dans le monde sont issues de la chimie, qu'elles soient synthétiques – polyesters, acrylique et autres – ou à base de bois transformé chimiquement (le bambou, la viscose et le tencel). En parallèle, 26% des fibres sont en coton et 11% sont en matières naturelles hors coton, à savoir majoritairement laine, soie et lin.

La réduction la part du coton qui utilise beaucoup de pesticides, ainsi que des matières synthétiques qui sont issues de la pétrochimie, relâche des microplastiques. Mais pour le reste, la question principale demeure la traçabilité. Il ne faut pas que les fibres provoquent du déboisement et doivent être produites dans de bonnes conditions de travail. Les matières naturelles végétales qui nécessitent peu d'eau et pas de pesticides, comme le lin et le chanvre, sont à favoriser.

De nouvelles matières, réalisées avec des sous-produits de l'industrie agroalimentaire, arrivent sur le marché. C'est par exemple le cas avec des épiluchures d'agrumes ou du marc de café. Nous pourrions faire la même chose avec les épiluchures de betteraves.

7.3 Les substrats imprimables

Il existe deux substrats imprimables connus : le PET (polyéthylène naphthalate = plastique pétrosourcé) et le PVC.

Concernant le PET : utilisation courante dans des fibres textiles (PET recyclés) dites "polaires" pour la confection de vêtements...

Pour que l'électronique portable sur des textiles puisse être utilisée de manière courante, il faut encore passer l'obstacle du lavage. Des chercheurs ont réussi à allier un textile imprimé de circuits intégrés (jet d'encre) à bas coûts et résistant à 20 cycles de lavage : électrodes en PEDOT:PSS. Pour minimiser les interférences liées à la rugosité du textile, ils ont utilisé une couche de planarisation (technique de lissage physico-chimique) en polyuréthane.

Outre l'impact sur le plan développement durable des produits ou technologies étudiées, la toxicité des matériaux semblent aussi nécessaire d'être étudié. En effet, le textile peut dans certain cas avoir des effets néfastes sur le porteur. La sensibilité de la peau varie énormément d'un sujet à l'autre.

8. Les applications

Les applications de l'électronique imprimée étirable sont en pleins développement. En effet, de nombreuses applications sont au stade de recherche et de test. Néanmoins, certaines d'entre elles nous entourent déjà mais en faible nombre. Ces applications vont pouvoir enregistrer des données, les transmettre ou "capter de l'énergie."

Cette partie fera le résumé d'applications concrètes (comme le montre la figure 21) dans différents domaines et leurs perspectives l'évolution.



Figure 21 : Exemple de circuit imprimé flexible

8.1 Le textile

De nombreuses applications de l'électronique imprimable étirable vont servir pour l'industrie du textile. En effet, les circuits imprimés doivent pouvoir s'adapter aux déformations du corps humain. Ces contraintes sont aléatoires et dans toutes les directions.

Les textiles intelligents sont un nouveau concept de textiles qui sont sensibles aux stimuli externes tels que la pression, le toucher, la température, l'humidité, la composition de l'atmosphère, les vibrations, les forces d'étirement et sont capables de réagir et d'interagir, de s'éclairer, de changer de couleur, de chauffer, de communiquer, de récolter et le stockage d'énergie, etc.



Figure 22 : Chemise de Vélo pour la surveillance de la posture corporelle.

Cette chemise (figure 22) est capable de capter la position du dos des cyclistes (capteur de mouvement). Elle permet de prévenir certains risques de blessures, de comprendre leurs apparitions. Les capteurs imprimés extensibles intégrés dans cet habit vont être illustrés dans la suite des exemples.



Figure 23 : Textile d'éclairage intelligent

Les capteurs sont capables de retransmettre la lumière absorbée (figure 23). Cette surface flexible imprimée convertit les surfaces inertes en objets d'éclairage intelligents. Les tissus industriels, les textiles de maison, les vêtements portables, les films techniques ou même le verre peuvent être fournis avec une fonctionnalité d'éclairage supplémentaire intégrée de manière ergonomique.

Les atouts de ce textile sont : la lumière flexible, le fait d'être personnalisable, l'intégration facile, pas de points de chaleur et la résistance aux chocs.



Figure 24 : Textile de détection de température, produit développé par Eurecat

Ce textile (figure 24) permet, grâce à des capteurs (lignes imprimées), de retranscrire la chaleur dégagée du corps humain. De nombreux autres capteurs permettent l'intégration d'autres fonctionnalités intelligentes telles des capteurs de : pression, humidité, ECG ect.

Le principal avantage de cette technologie est le haut niveau d'intégration, qui peut avoir un impact significatif sur la sensation de confort, la liberté de conception et les coûts de production.



Figure 25 : Pistes conductrices extensibles, produit développé par Centi

Ces pistes conductrices extensibles sont directement imprimées sur des substrats flexibles, tels que les textiles et les membranes (voir figures 25). Les pistes conductrices extensibles imprimées sont pliables et extensibles, adaptées pour être intégrées dans des états qui nécessitent une modification constante de la forme et des dimensions. Elles peuvent être utilisées pour connecter différents types de capteurs et composants électroniques, et peuvent également être utilisées comme capteurs capacitifs, en modifiant la conception et l'intégration avec la commande électronique.

Pour l'avenir, il est envisagé de remplacement des fils conducteurs plus visibles et plus difficiles à intégrer dans les textiles et de créer des pistes conductrices en substrats souples et extensibles pour la connexion de capteurs et de composants électroniques.



Figure 26 : Electronique extensible s'adaptant au corps (patches, vêtements), produit développé par Centi

Conception et intégration de technologies dans des tissus textiles (figure 26) pour des propriétés interactives et fonctionnelles. Conception conceptuelle de solutions de prototypage et de tissus fonctionnels à travers des textiles intelligents, l'ergonomie et l'esthétique.

Caractéristiques du produit :

- ✘ Sécurité et style dans les vêtements en utilisant la technologie de lumière active imprimée T-shirt interactif avec capteurs capacitifs et LED hybrides pour jouer avec et stimuler la mémoire en même temps
- ✘ Manchon de capture de mouvement avec capteurs à jauge de contrainte connectés à un avatar. Il est destiné aux patients ayant des besoins de réadaptation cognitive et physique et conçu pour être utilisé à la maison.

8.2 La santé : médicale et pharmaceutique

L'électronique imprimée étirable connaît d'impressionnants atouts dans le domaine médical et pharmaceutique. Comme les exemples ci-dessous, ce sont principalement des capteurs qui vont être l'objet de ces exemples.



Figure 27 : Capteurs capacitifs imprimées pour intégration dans des substrats flexibles

Le développement et optimisation de capteurs capacitifs imprimés sur des substrats flexibles est l'un des plus grands enjeux pour l'industrie paramédical. Les capteurs peuvent être imprimés en utilisant des équipements de sérigraphie (feuille à feuille ou R2R) dans différents types de substrats de très faible épaisseur.

Les capteurs peuvent être utilisés pour détecter la proximité d'un doigt, d'une main ou d'objets. Ils servent aussi pour des intérieurs de voitures et appareils électroménagers.

Ils remplacent les capteurs tactiles mécaniques conventionnels, ne nécessitant que la proximité pour l'actionnement.



Figure 28 : Patches de santé pour cosmétiques



29 : Capteurs de pression

Ces patches imprimés (R2R) sont des batteries. Les piles à combustible catalysent par des enzymes sont des sources d'énergie capables de transformer l'énergie chimique du directement en énergie électrique via des réactions électrochimiques (figure 28).

Grâce aux capteurs de pression (piézorésistif / piézoélectrique), la marche du patient les portant est analysée très précisément. En effet, ces capteurs (figure 29) peuvent être utiles pour les podologues. Les analyses de marche journalières des patients ou des sportifs peut être alors étudiés plus en détail pour répondre à des problèmes de chevilles-genoux-hanches-dos. Ces capteurs peuvent mesurer la force en continu et les variations de pression.



Figure 30 : Réseau de capteurs imprimés pour casque



Figure 31 : Gilet intelligent

Ce réseau de capteurs est utilisé pour enregistrer les différents impacts que la tête (figure 30) peut subir lors d'accident. Les électrodes imprimées sont à bases d'argent et les capteurs sont imprimés avec de l'encre (dite "Graphine") sensible à la pression et allant jusqu'à pouvoir mesurer un impact au maximum de 3000 Newtons.

Sur le gilet (figure 31), les électrodes sont attachées à un circuit imprimé flexible. Le circuit est connecté au patient via un "gilet intelligent". Ce gilet est facile d'utilisation. Il suffit de le porter comme un simple t-shirt. Ce gilet n'est pas encore disponible pour effectuer des tests.

Utilisation future : la surveillance des enfants asthmatiques la nuit et la surveillance du rythme cardiaque

Ces installations comprennent la sérigraphie avec un haut niveau d'expérience en électronique aux technologies de fixation de substrat pour l'électronique portable. L'objectif final de la solution développée est de permettre à tous les enfants souffrant d'asthme non contrôlé dans le monde de prendre le contrôle de leur maladie et de créer une vie meilleure pour eux-mêmes et leurs parents.

8.3 Usage quotidien

Certaines maisons à la pointe de la technologie et certaines entreprises sont amenées à posséder des systèmes d'électronique flexible imprimée décrits ci-dessous :

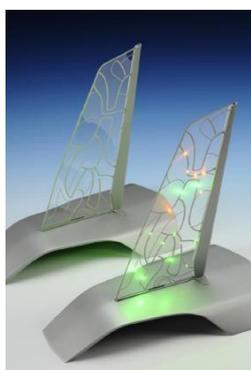


Figure 32 : Luminaire de détection de la qualité de l'air intérieur



Figure 33 : Chargeur sans fil

Ce luminaire (figure 32) permet de mesurer le CO₂, la température, l'humidité et la pression atmosphérique. Il permet uniquement la de détection de la qualité de l'air intérieur (R2R).

Les LED indiquent la qualité de l'air, des résultats précis dans les données envoyées au smartphone ou au système d'automatisation du bâtiment.

Le dispositif imprimé de chargeur sans fil (figure 33) pour les téléphones portables est imprimé sur du papier avec de l'encre conductrice. Ces capacités ne sont pour l'instant pas celle d'un chargeur sans fil et encore loin d'un chargeur sur secteur.



Figure 34 : Capteur Bluetooth

Ce capteur (figure 34) permet d'envoyer les données liées aux mouvements et à la température du patient. Il est intégré en élastomère. La communication et la charge sont sans fil. La batterie est flexible et surmoulée. L'impression est en R2R avec de l'encre contenant des particules d'argent sur PET.

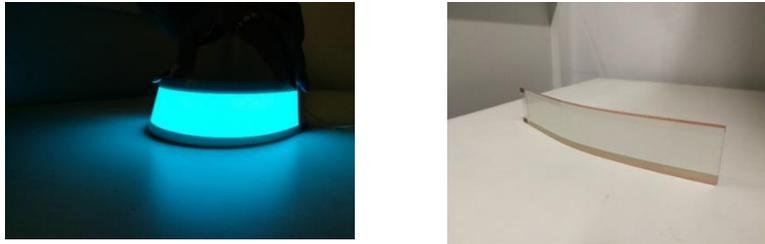


Figure 35 : Système d'éclairage électroluminescent

Ce dispositif électroluminescent (figure 35) est un système d'éclairage par technologies d'impression. Il sert principalement pour un éclairage décoratif ou informatif.

Il peut être appliqué dans les vêtements portables, les intérieurs automobiles (dans les substrats textiles ou plastiques), les sols, les murs et dans plusieurs structures textiles (ex: textiles de maison ou vêtements).

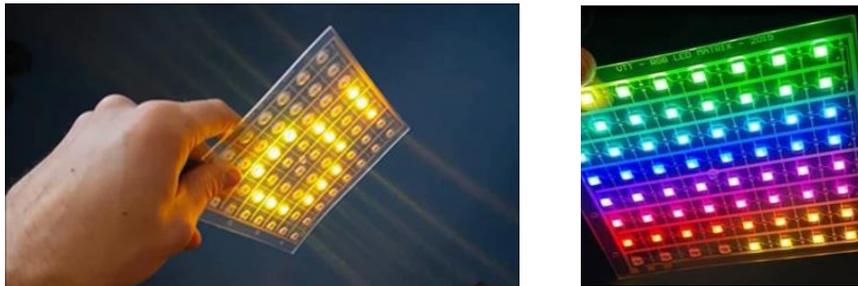


Figure 36 : Matrice LED

C'est un module flexible d'affichage (figure 36), de signalisation et d'éclairage à matrice LED. Il est entièrement contrôlable et personnalisé. Les éléments flexibles peuvent être connectés pour créer des systèmes de grande surface. Réglage de chaque LED comme vous souhaitez faire défiler les messages texte, d'autres images.



Figure 37 : Chauffage imprimée



Figure 38 : Etiquette d'emballage intelligent

Ce système de chauffage imprimé (figure 37) est réalisé en R2R. Il peut être intégré dans différents matériaux pour le chauffage. La puissance peut être contrôlée en adaptant les propriétés des matériaux et la conception du circuit.

Ce système d'emballage intelligent (figure 38) contient les informations liées au produit. Il évalue et transmet aussi des informations pertinentes tel la température et l'humidité. Cette étiquette intelligente RFID est alimentée par une cellule de batterie imprimée qui enregistre la température et l'humidité.

8.4 Les panneaux solaires



Figure 39 : Panneaux solaires imprimés

Ces cellules solaires organiques (figure 39) sont imprimées et couchées par R2R. La transparence et la flexibilité sont les caractéristiques pour s'adapter à tous types de bâtiments. La technologie à faible coût est au bord de la commercialisation. De plus, elle peut générer jusqu'à 10MW pour un bâtiment de plus d'un kilomètre carré.

Les cellules peuvent être connectées ensemble dans un «panneau» puis les panneaux peuvent être connectés dans un module solaire, qui pourrait avoir une puissance de sortie de quelques kW. La révolution solaire photovoltaïque de première génération (1G) a été basée sur des cellules solaires en silicium polycristallin. Lorsqu'elles sont reliées entre elles, elles peuvent produire des «fermes solaires» fonctionnant à l'échelle MW et même GW. La technologie qui sous-tend ces cellules 1G est le transistor à jonction P-N.

Une deuxième génération de panneaux solaires photovoltaïques a utilisé divers processus de «couche mince», où une mince couche de matériau photosensible est déposée sur le verre, comme l'arséniure de gallium (GaAs) ou le cadmium, l'indium, le gallium et les éléments (CIGS). Ces cellules solaires 2G peuvent extraire plus d'énergie de la lumière du soleil en fonction du nombre de films utilisés, pour produire des cellules hybrides ou en tandem - mais elles sont soumises à la même contrainte 1G de devoir être déposées sur du verre, une contrainte majeure de coût et de flexibilité.

Désormais, une gamme de cellules solaires 3G est capable de surmonter cette contrainte en utilisant des matériaux photosensibles sans silicium et en étant imprimées sur des feuilles de polymère (plastique), ce qui les rend légères, flexibles et peu coûteuses.

Les principaux candidats dans ce domaine émergent des cellules solaires 3G sont, d'une part, les cellules inorganiques fabriquées à partir de matériaux de pérovskite (abondantes, bon marché, mais pas encore suffisamment stables pour une utilisation en masse) et, d'autre part, les cellules de

polymère organique, où le matériau photo sensible est basé sur le carbone et elles que celles utilisant le réseau de fullerène.

Ces cellules solaires organiques sont très prometteuses car le matériau photosensible peut être transformé en «encre» et imprimé à basse température sur une grande surface de plastique bon marché.

Une caractéristique clé des cellules OPV est qu'elles ne contiennent aucun ingrédient toxique, par rapport à certaines des cellules solaires inorganiques alternatives en cours de développement.

Ces cellules solaires photovoltaïques (figure 40) organiques sont imprimées pour moins de 6,19 € par mètre carré - car le processus n'est pas complexe, utilise des matériaux abondants et peu coûteux.



Figure 40 : Panneaux solaire flexibles imprimés sur un toit d'un bâtiment

D'autres applications similaires sont en phase de test.

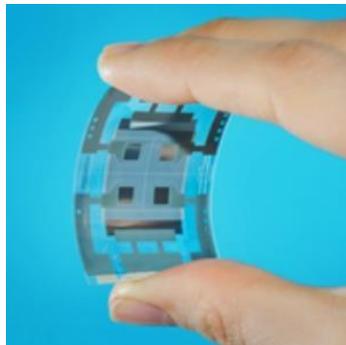


Figure 41 : Capteur de longueurs d'ondes

Ce capteur (figure 41) permet de détecter la longueur d'onde reçue. Ses plages sont comprises entre 350 nm et 1100nm.

8.5 Perspectives d'évolution techniques

Toutes les applications de l'électronique étirable évoquées précédemment ne représentent qu'une partie de celles déjà existantes ou en phase de recherche. Ces technologies sont principalement en phase de tests ou de recherche. Cependant, les perspectives d'évolution sont conséquentes. La technologie ne cesse de se développer, que cela soit des techniques d'impression, des composants étirables et de l'électronique.

Certaines principales avancées et outils de l'électronique imprimable sont liées aux capteurs du corps humain. L'objectif primordiale est aussi d'obtenir des capacités au moins similaires aux technologies non étirables déjà existantes.

II. RAPPORT ECONOMIQUE

1. Caractérisation des marchés et analyse de l'environnement économique [21][22][23][24]

Le secteur de l'électronique imprimée est en forte expansion depuis quelques années et ne va cesser de s'étendre. En effet, comme vu dans le rapport technique, l'électronique imprimée permet de nombreuses nouvelles applications et ce dans divers domaines tels que le médical, le textile, le sport etc. Il est donc important lorsqu'on parle de ce secteur d'avoir quelques ordres de grandeur en tête.

1.1 L'électronique imprimée et l'électronique imprimée étirable

Les figures numéro 42 décrivent des prévisions de l'évolution économique de l'électronique imprimée suivant de nombreuses applications phares au fil des années.

La figure 42.1, réalisée en 2016, prévoit une multiplication du marché par 6 en 10 ans, ce qui correspond à une augmentation fulgurante des applications utilisant l'électronique imprimée.

La figure 42.2, réalisée en 2020, prévoit toujours une augmentation mais plus légère, puisque l'électronique imprimée aura déjà pris sa place sur le marché de l'imprimerie en général.

Il est intéressant, avec ces deux graphiques, de comparer la prédiction et la réalité. En 2016, IDTechEx prévoyait un marché de 45 milliards de dollars pour 2020 et le résultat réel cette année-là est de 40 milliards de dollars, légèrement plus faible. De plus, il est possible de comparer les valeurs des marchés suivant les applications citées. Il était prévu un revenu à hauteur d'une vingtaine de milliards de dollars concernant les OLED, chiffre nettement supérieur dans la réalité puisque les OLED représentent le plus gros marché de l'électronique imprimée en 2020 avec 33 milliards de dollars environ. Dans les prédictions, le domaine du photovoltaïque détenait la 2e plus grosse part de marché mais s'est fait détrôner dans la réalité par les capteurs. Enfin, de nouvelles applications voient le jour comme le E-Textile, se développant de plus en plus en électronique imprimée, d'où l'importance d'étudier l'électronique imprimée étirable et applicable aux textiles.

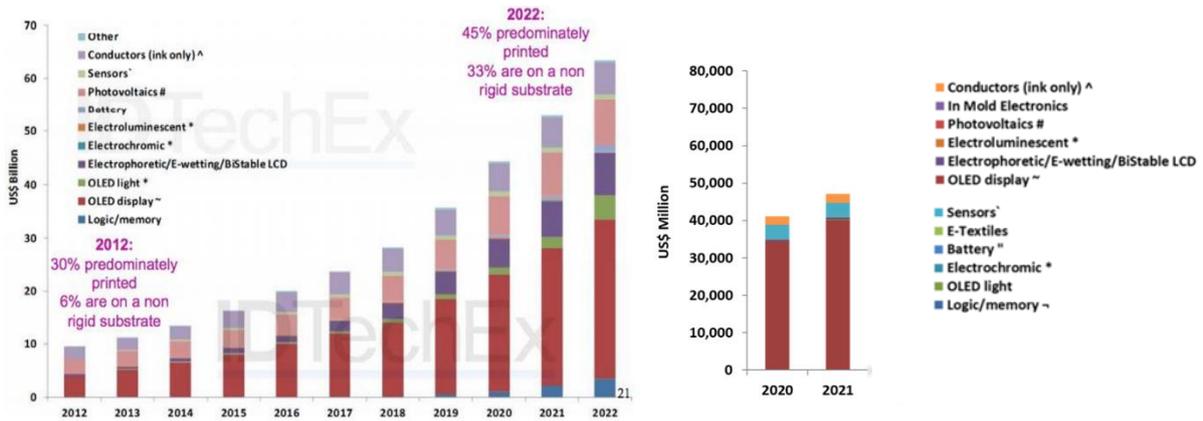


Figure 42.1 et 42.2 : Prévisions économiques du secteur de l'électronique imprimée entre 2012 et 2022 [Source IDTechEx, 2016]

Dans cette optique, la figure 42.2 représente le marché de l'industrie de l'électronique imprimée, organique et flexible en 2019.

Ce marché avait une valeur de 37,1 milliards de dollars, ce qui correspond aux prédictions réalisées ci-dessus par IDTechEx en 2016. Plus de 80% du marché est détenu par les affichages comprenant notamment les affichages par OLED, ce qui corrobore les données de la figure 43.

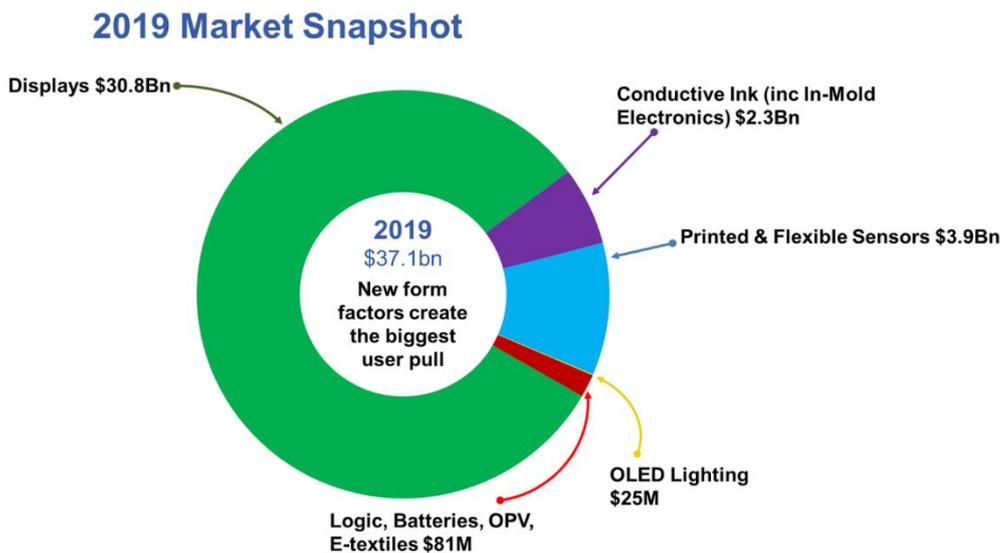


Figure 43 : le marché de l'industrie de l'électronique imprimée organique et flexible en 2019 [Source IDTechEx, Déc 2019]

L'électronique imprimée étant en expansion, l'électronique imprimée étirable fait l'objet de nombreuses études, expérimentations et applications comme vu dans le rapport technique et dans la figure 43 ci-après. La figure 44 représente l'évolution du nombre de produits contenant de l'électronique étirable dans différentes utilisations. L'accès aux chiffres exacts n'a pas pu être obtenu, néanmoins l'évolution est quand même décrite. Cette figure datant de 2019, elle traduit l'augmentation non négligeable d'éléments électroniques étirables dans les produits en une année seulement (depuis 2018), avant de prédire une explosion après 2020. Cette figure montre donc

l'importance des recherches concernant l'électronique imprimée étirable dans plusieurs domaines puisqu'elle décrit une demande et une utilisation très forte dans les années à venir.

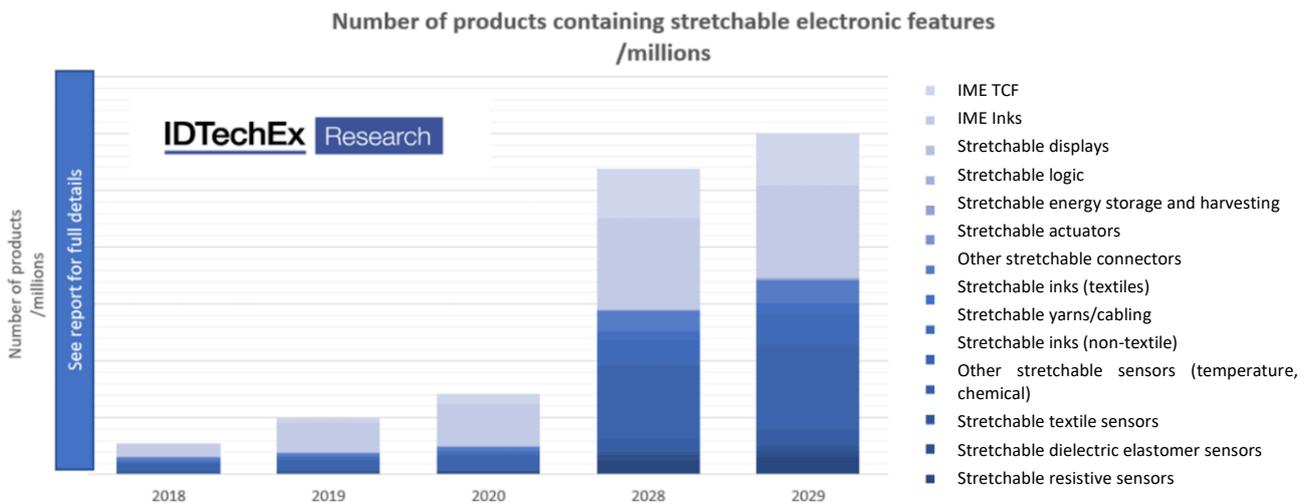


Figure 44 : évolution du nombre de produits contenant de l'électronique étirable [Source IDTechEx, Déc 2018]

1.2 Les métaux dans les encres conductrices

Les méthodes décrites dans le rapport technique présentent des éléments conducteurs. Voici dans le tableau 7 les prix de plusieurs métaux d'encres conductrices recensés en 2014.

Minerai	Taille des nanoparticules	Prix
Nanoparticules de cuivre	Diamètre : 5 à 7 nm	438 \$/kg
Nanofils de cuivre	Diamètre : 150 nm +/- 50 nm Longueur : 5 µm et +	44 000 \$/kg
Nanoparticules d'argent	Diamètre : 300 nm +/- 100 nm Longueur : 5 µm et +	4 970 \$/kg
Nanotubes de carbone	Diamètre : 1 à 2 nm Longueur : 5 à 20 µm	168 000 \$/kg
Graphène	Diamètre : 11 à 15 nm	2 450 \$/kg

Tableau 6 : Taille et prix des différents métaux contenus dans les encres conductrices [Source : Cerig, 2014]

Bien que l'argent soit plus cher que le cuivre, il présente l'avantage de ne pas s'oxyder aussi rapidement. Les nanotubes de carbone sont encore très chers, ce qui n'est pas envisageable pour une fabrication de gros volumes.

La figure 45 suivante représente les pourcentages d'utilisation de ces différents métaux dans les encres conductrices en 2016.

Plus de 35% des encres conductrices contiennent de l'argent, comme dans les méthodes décrites précédemment. Les polymères comme le PEDOT:PSS sont aussi très représentés dans les encres conductrices notamment grâce à leur transparence qui permet la fabrication des OLED, produit phare de l'électronique imprimée actuellement.

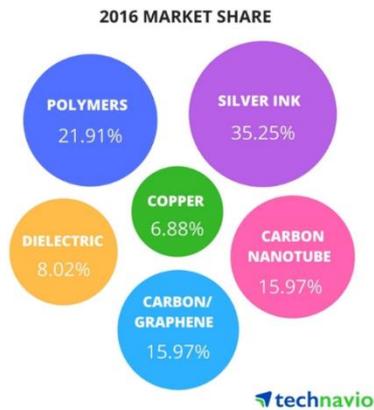


Figure 45 : Parts de marchés des métaux dans les encres conductrices en 2016 [Source : Business Wire, Mars 2017]

2. Analyse des contextes législatifs et réglementaires

Dans le monde entier, les secteurs industriels quels qu'ils soient sont soumis à des lois et réglementations. Les nombreux rapports du GIEC [23] incitent fortement à un but de réduction des gaz à effet de serre. De nombreux accords en résultent, obligeant les pays ayant signés, à atteindre ces objectifs à plus ou moins long terme. Les industries ont donc des objectifs concernant l'énergie et le climat dans l'optique d'une baisse de l'empreinte carbone. Le secteur de l'électronique imprimée étirable ou non y est forcément touché.

Les processus de production de l'électronique imprimée, à température et à air ambiants, reposent sur des dépôts additifs de matériaux de très faible épaisseur et comportent un nombre réduit d'étapes. Cette industrie fait généralement appel à des salles propres peu consommatrices d'énergie électrique et d'eau.

L'électronique imprimée contribue à un impact environnemental dans tous secteurs de marché :

- ✗ Le transport, gain de poids donc moins de consommation, plus de fonctionnalités dans un volume réduit.
- ✗ Le bâtiment, intégration facile aux environnements existants.
- ✗ L'agriculture, films photovoltaïques souples intégrables dans les serres.
- ✗ Le luxe, packaging intelligent et recyclable.
- ✗ La santé, traçabilité de médicaments à moindres coûts [24]

Au cours des dix dernières années, les principaux acteurs de la chimie organique ont largement investi dans la R&D pour créer les nouveaux matériaux basés sur les propriétés semi-conductrices des matériaux organiques et des polymères destinés à l'électronique imprimée : grande surface, mince, légère, flexible et prochainement transparente.

Les entreprises qui fabriquent les produits basés sur l'électronique organique attachent une grande importance aux aspects environnementaux. L'électronique imprimée laisse une faible empreinte carbone : le procédé de fabrication s'appuie sur des solutions employées à la température ambiante et à l'air ambiant en utilisant des matériaux transformables en solution.

Cette industrie fait généralement appel à des salles blanches de classe 10 000 peu consommatrice d'énergie électrique et d'eau. Les processus de fabrication reposent sur la déposition de matériaux d'une épaisseur de seulement quelques dizaines de nanomètres (soit de très faibles quantités de matériaux) et comportent également un nombre réduit d'étapes (typiquement 5 à 6).

En outre, l'électronique imprimée utilise le plastique (potentiellement recyclé ou à base de cellulose), des substrats de verre ou des matériaux non toxiques.

En France en 1989 est établie la norme française NF C 93-713 [25] de spécification des circuits imprimés. Les circuits sont catégorisés en différentes classes en fonction de leur utilisation et donc de la finesse de fabrication. À cette époque, la technologie se limite à la classe 6 correspondant par exemple à une largeur de piste de 120 à 150 μm .

En 2013, cette norme est de moins en moins utilisée au profit du standard IPC d'origine américaine et accepté comme une référence internationale par l'ensemble des fabricants d'électronique du monde.

Parmi les nombreuses normes IPC définissant les standards de conception, de performance et de test des circuits imprimés, on peut citer les plus importantes :

- IPC-2221, normes génériques de conception ;
- IPC-4101, normes sur les matières utilisées (pré-imprégnés et stratifiés) ;
- IPC-A-600, critères d'acceptabilité ;
- IPC-TM-650, définitions des méthodes de test ;
- IPC-6012, définitions et spécification des propriétés des circuits imprimés rigides.

La présente norme est applicable aux cartes imprimées rigides simple ou double face à trous métallisés ou non métallisés, et aux cartes multicouches rigides, réalisées sur matériaux à base de résine phénolique et époxyde, avec renfort verre ou papier cellulose par une méthode soustractive et/ou additive, dont les impressions conductrices sont métalliques, sur base de cuivre, et dont les faces sont, ou non, couvertes d'un revêtement épargne et de marquages.

De plus, l'électronique imprimée comporte des systèmes produisant des ondes électromagnétiques comme les capteurs, antennes RFID... Ils doivent se plier à des réglementations pour ne pas menacer les individus utilisant cette technologie ou les technologies qui les entourent.

En France, l'Agence Nationale des FRéquences (ANFR) a la responsabilité de planifier et gérer l'utilisation du spectre fréquentiel. Chaque application nécessitant l'émission d'ondes électromagnétiques doit être autorisée par l'ANFR, qui lui attribue une bande de fréquence et définit le niveau de puissance nécessaire pour le bon fonctionnement de l'application, afin que cela ne perturbe pas le fonctionnement des autres appareils et respecte des gabarits fixés pour des considérations de santé publique. Dans la gamme de fréquences de 8 kHz à 65 GHz, une grande partie du spectre fréquentiel (plus de 60 %) est réservée à la défense nationale et à l'Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des postes (ARCEP) [5]. Les bandes ISM (Industrial, Scientific and Medical) sont des bandes de fréquences qui ne sont pas soumises à des réglementations nationales et qui peuvent être utilisées gratuitement et sans autorisation dans le cadre d'applications industrielles, scientifiques ou médicales. Le reste du spectre est utilisé par des compagnies privées pour la télédiffusion ou les télécommunications.

Enfin, certains produits de l'électronique imprimée étirable sont conçus pour être en symbiose avec le corps humain. En effet, des réactions allergiques peuvent se produire au contact de la peau avec certains matériaux utilisés ou des interactions avec des technologies déjà présentes chez un patient comme le pacemaker.

La norme IEC TS 60479-1 détaille les effets du courant sur l'Homme.

L'électronique imprimée est un mixte de plusieurs technologies et doit donc se confronter à de nombreuses réglementations. Les chercheurs et industriels doivent donc s'adapter aux normes et lois présentes.

3. Diagramme Porter

Le **diagramme de Porter** situé ci-après étudie le marché de l'électronique imprimée en analysant les différents éléments qui sont susceptibles d'influer sur celui-ci. En effet, 5 acteurs sont prédominants dans ce diagramme :

- Les fournisseurs
- Le nouvel entrant : l'électronique imprimée étirable
- Les substituts (fournissent le même résultat mais de manière différente)
- Les clients et producteurs
- Les concurrents

L'électronique imprimée étirable étant toujours au stade de recherche, ses producteurs et acteurs en recherche et développement sont confondus et ses clients sont potentiels car les produits ne sont pas encore vraiment commercialisés

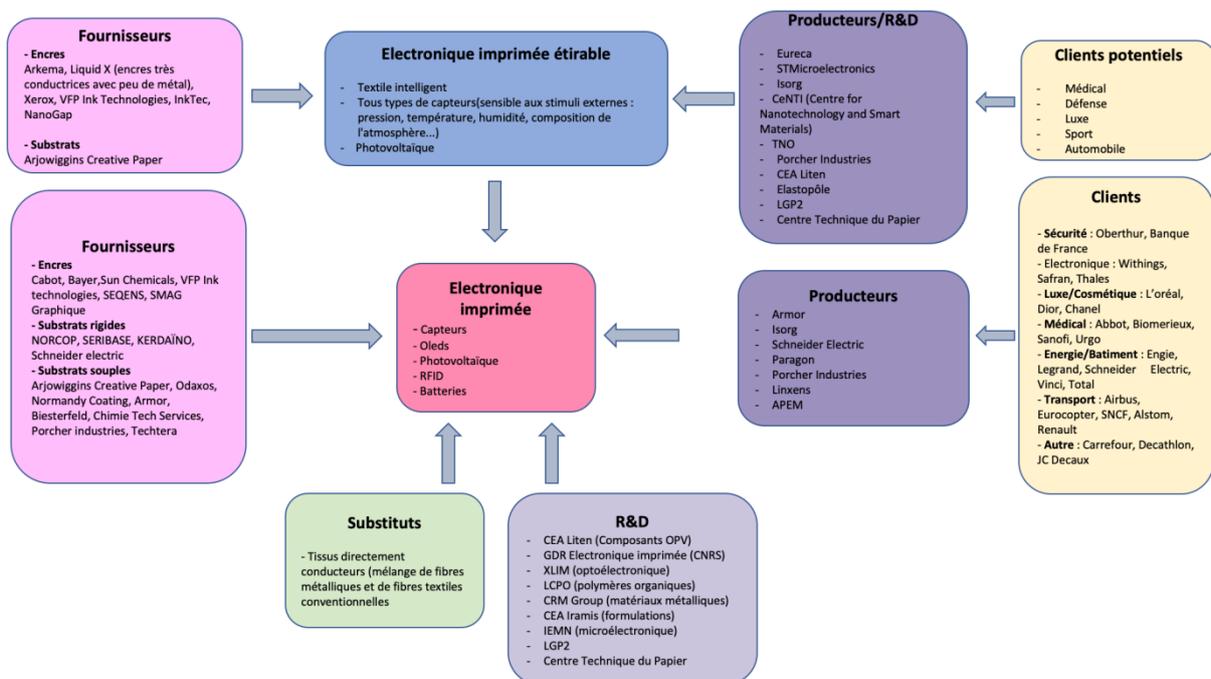


Figure 47 : Diagramme de Porter

La chaîne de valeurs de Porter permet de distinguer les différentes étapes techniques qui permettent d’aboutir à un produit fini ou semi-fini. Une chaîne de valeurs de Porter a été construite pour l’électronique imprimée “classique” et une autre pour l’électronique imprimée étirable afin de comparer les différentes étapes de la production.

En effet, la différence notable entre l’électronique imprimée étirable et l’électronique imprimée “classique” réside dans une étape de préparation du substrat avant impression afin de rendre celui-ci à la fois conducteur et étirable. Les types d’encre et de substrat sont également différents car ces éléments doivent pouvoir résister aux contraintes d’étirement.

4. Chaîne de valeur

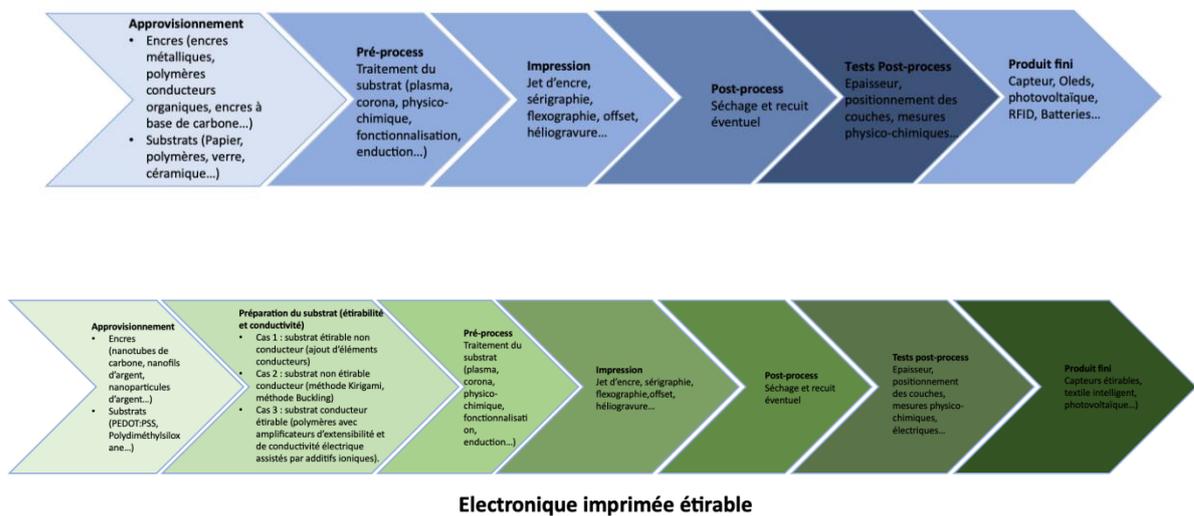


Figure 48 : Chaînes de valeurs

III. PERSPECTIVES D'EVOLUTION

1. Variables essentielles

- Étirabilité et conductivité du produit
- Procédés d'impressions conventionnels
- Plusieurs techniques différentes peuvent être utilisées
- Symbiose entre substrats et encres
- Coût de production

2. Facteurs clés de développement

- Pas de concurrence actuellement
- Performances par rapport à l'électronique imprimée
- Réglementations liées à l'utilisation
- Développement d'objets connectés (capteurs Bluetooth, luminaires de détection de qualité de l'air...)
- Applications nombreuses donc investissements multiples

3. Principaux acteurs

Producteurs/ R&D :

Eurecat (textile intelligent), STMicroelectronics, Isorg, CeNTI (Centre for Nanotechnology and Smart Materials), TNO, Porcher Industries (textile intelligent), CEA Liten, Elastopôle, LGP2, Centre Technique du Papier.

Encres :

Arkema, Liquid X (encres très conductrices avec peu de métal), Xerox, VFP Ink Technologies, InkTec, NanoGap

Substrats : Arjowiggins Creative Paper

4. Matrice SWOT

FORCES	FAIBLESSES
<ul style="list-style-type: none"> • Étirable, dispositif conformable à des géométries complexes : adaptation au corps humain (innovant) • Légèreté • Nouvelles applications : nombreux domaines différents (militaire, médical, textile, sport, automobile, luxe...) • Maintien des propriétés mécaniques et électriques malgré les contraintes d'étirements et de flexion • Utilisation des procédés d'impression classiques (sérigraphie, jet d'encre...) • Différentes techniques : substrat étirable non conducteur (ajout d'éléments conducteurs), substrat non étirable conducteur (méthode Kirigami, méthode Buckling), substrat conducteur étirable (polymères avec amplificateurs d'extensibilité et de conductivité électrique assistée par additifs ioniques). 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût des matières premières (nanoparticules d'Argent, CNTs) • Pas encore assez développée (pas beaucoup de fournisseurs, encore au niveau de la recherche) • Performances (pas encore au niveau de l'élec imprimée classique) : électriques (conductivité), mécaniques (résistance) ...
OPPORTUNITES	MENACES
<ul style="list-style-type: none"> • Développement d'objets connectés (capteurs Bluetooth, luminaires de détection de qualité de l'air...) • Développement de nouveaux matériaux (substrats et encres) : PEDOT;PSS, encres métalliques, CNT, graphène, AgNW... • Innovation (gilets intelligents, capteurs capacitifs étirables...) • Tendances sociétales 	<ul style="list-style-type: none"> • Tissus directement conducteurs (mélange fibres métalliques et textiles) • Impact sur la santé méconnu du contact peau/objet connecté • Législation sanitaire et éthique: ondes, contact peau/circuits imprimés, liberté individuelle ...

Figure 49: Matrice SWOT

Ci-dessus la matrice SWOT liée à l'électronique imprimée étirable. Elle résume les paramètres internes (forces et faiblesses) et externes (opportunités et menaces).

Pour les entreprises traditionnelles ou start-up se lançant dans l'électronique imprimée étirable, il est intéressant d'établir un diagnostic stratégique afin de pouvoir se positionner sur ce marché en développement.

L'enjeu majeur de ce domaine est de trouver une synergie entre procédés d'impression, encres et substrats capables de se déformer sans altérer les propriétés électriques. Différentes techniques et procédés sont déjà bien en place. Il reste néanmoins à atteindre les performances de l'électronique imprimée conventionnelle par exemple en termes de conductivité.

De plus, différentes opportunités peuvent voir le jour dans ce domaine. En effet, de nombreux objets connectés vont pouvoir être modifiés, améliorés ou inventés grâce à cette nouvelle capacité à s'étirer de l'électronique imprimée.

Cependant, il reste de nombreuses années avant de voir émerger en grande proportion l'électronique imprimée étirable. Cela est dû aux nombreuses contraintes telles que la législation sanitaire, les dangers de contact avec la peau ou la concurrence (tissus direction conducteur).

5. Scénarios

Etat actuel commun à tous les scénarios :

L'électronique imprimée étirable est à l'état de recherche en ce qui concerne les différentes techniques pour combiner l'étirabilité et la conductivité du produit. Actuellement, les performances électriques ne sont pas au niveau de celles produites par l'électronique imprimée "classique" et les prix des matériaux utilisés sont élevés.

Scénario 1 : Optimiste

En 2027, l'efficacité de l'électronique imprimée étirable explose dans de nombreux domaines d'applications.

Hypothèses :

- La productivité élevée de l'électronique imprimée garantit des coûts faibles et par conséquent des prix attractifs. (20%)
- Des matériaux et des encres sont formulés pour atteindre des caractéristiques égales et/ou supérieures à celle de l'électronique imprimée conventionnelle. (40%)
- Les procédés d'impression permettent une productivité conséquente et optimale pour ces applications. (50%)
- La séparation des substrats et de l'électronique dans les applications permet un fort taux de recyclage de ces produits. (20%)

Le monde de la santé utilise de nombreuses technologies de l'électronique imprimée. Il a pu faire des avancées considérables dans la prévention de certaines maladies grâce à des gilets/T-shirts qui permettent de capter les potentiels problèmes des patients. C'est un cercle vertueux entre les caractéristiques des produits, l'utilité et la demande qui croît sans cesse.

Le monde est toujours de plus en plus connecté. Chaque personne veut avoir son vêtement connecté, relié à son portable via des applications, permettant de suivre ses caractéristiques physiologique toute la journée.

Des formulations nouvelles d'encre avec des particules conductrices permettent d'avoir des coûts complètement dérisoires comparé à ceux actuels. Les encres conduisent mieux le courant électrique et leurs caractéristiques sont peu impactées lors de déformations. L'équipe FunPrint, du laboratoire LGP2 de Pagora, a trouvé des particules qui ont, avec une simple couche d'impression, une conductivité excellente. Ces pistes peuvent subir de larges déformations et plis sans altérer leurs propriétés. Au bout de 1 an, ces encres sont brevetées et industrialisées dans des sociétés tel que InkTec ou Arkema

Des entreprises se sont fortement ancrées dans le marché de l'électronique imprimée. Cela permet une production conséquente et la création d'emplois dans ce domaine.

Les principaux dirigeants ont enfin pris en compte les menaces liés au dérèglement climatique. Ils ont investi plusieurs milliards dans des laboratoires de recherches pour avoir une économie basée sur le cycle de vie des produits. Les matériaux sont alors utilisés dans leur optimalité. Il est désormais possible de séparer substrat et encres pour les réutiliser ou leur donner une seconde vie.

La probabilité de réalisation de ce scénario est de 32%.

Scénario 2 : Tendanciel

En 2035, l'électronique imprimée étirable entame la commercialisation dans les domaines de la santé, du militaire et du textile.

Hypothèses :

- L'électronique imprimée étirable sort de sa phase de recherche et développement pour se commercialiser fortement dans des secteurs spécifiques tels que les domaines médical et militaire. (60%)
- Les performances électriques et mécaniques pouvant être atteintes se sont améliorées (50%)
- Les prix de ces produits restent élevés. (60%)
- L'électronique imprimée étirable commence à être connu du grand public (même s'il y a peu accès). (40%)
-

Les méthodes pour rendre étirables les matériaux ont bien évolué, la productivité a augmenté ce qui a permis à l'électronique imprimée étirable de se développer de manière industrielle.

Les performances électriques de l'électronique imprimée étirable se sont rapprochées des performances obtenues en électronique imprimée non étirable.

L'augmentation de l'espérance de vie ainsi que des maladies chroniques comme le diabète ou l'hypertension artérielle, a rendu le suivi quotidien des paramètres physiologiques très important, c'est pourquoi les sociétés telles que Feet Me (semelles avec capteurs pour les diabétiques) ont fortement investi pour développer et commercialiser l'électronique imprimée étirable dans le domaine du médical.

Les coûts restent cependant assez élevés (notamment à cause des encres utilisées), c'est pourquoi les domaines d'application restent assez spécifiques (médical, militaire, luxe) et les particuliers y ont encore peu accès, même si l'électronique imprimée étirable commence à être connue du grand public.

La probabilité de réalisation de ce scénario est de 53%.

Scénario 3 : Pessimiste

En 2040, l'électronique imprimée étirable souffre de l'effet néfaste des objets connectés sur la santé et ne se commercialise pas.

Hypothèses :

- Les applications restent trop spécifiques. (20%)
- Les coûts restent trop importants vis-à-vis des autres techniques développées. (30%)
- Les impacts sur la santé des équipements électroniques/connectés ralentissent fortement le développement des produits. (45%)

Des études "choc" ont vu le jour concernant les effets très néfastes des appareils électroniques et connectés sur le cerveau humain. Ainsi, l'idée des textiles intelligents et donc d'avoir des éléments électroniques directement en contact avec la peau et proche du cerveau a été perçue comme un danger. De nombreuses associations défendant la santé se sont opposées au développement et à la commercialisation des produits, incitant ainsi les gouvernements à établir des lois strictes concernant leur fabrication et leur utilisation.

Le département des textiles fonctionnels de la société Eurecat a préféré modifier son orientation R&D en abandonnant le volet "électronique imprimée étirable" pour se tourner vers la stratégie d'utiliser des tissus directement conducteurs, technique ayant évolué quelques années auparavant et présentant des coûts de production moins chers.

Le e-textile étant le produit phare de l'électronique imprimée étirable, sa non-commercialisation a fait sombrer le développement des autres applications possibles. En effet, les coûts de production étant élevés et la population hostile à ces nouvelles applications connectées, les industriels n'ont pas pris le risque d'investir plus dans l'électronique imprimée étirable, qui reste donc à l'état de recherche.

La probabilité de réalisation de ce scénario est de 32%.

CONCLUSION

Cette vue d'ensemble des technologies disponible pour fabriquer de l'électronique imprimée flexible permet une perspective d'avenir prometteur. Les différentes techniques d'impression déjà existant ont permis de s'adapter et sélectionner les meilleurs procédés. Les connaissances sur l'électronique permettent aussi de choisir les meilleurs composants. C'est en choisissant la meilleure symbiose entre les encres, les substrats et procédés d'impression que de nouveaux procédés verront le jour. Pour l'instant, beaucoup de technologie sont en période de tests et de recherches. Elles vont permettre de remplacer des technologies déjà existantes et mieux atteindre les ambitions techniques liées à la flexibilité. On peut néanmoins comprendre que dans les années à venir, de nombreuses nouvelles applications vont permettre de mieux s'adapter à nos besoins.

Le marché de l'électronique imprimée est déjà ancré et continue de s'accroître dans plusieurs nouveaux domaines tandis que le marché de l'électronique imprimée étirable est principalement à un stade de recherche et de tests. Ce secteur est en expansion avec de nombreuses technologies qui vont pouvoir modifier et améliorer certains objets déjà existants ou en créer s'adaptant aux besoins de notre société. Certaines de ces nouvelles technologies font partie des technologies de pointes et les prix de leurs matières premières, notamment les encres, sont élevés. Le développement et la production à grande échelle pourra dans le futur permettre de diminuer ces prix. Cependant, comme toute industrie, elle reste encadrée par de nombreuses normes. Et avec la transition écologique, certains matériaux vont être plus portés sur le devant de la scène que d'autres par soucis de recyclabilité, comme le papier. Le développement des matériaux avec des caractéristiques étirables, des encres conductrices... reste néanmoins la clé de voûte pour propulser l'industrie de l'électronique étirable en tant que marché ancré dans notre société.

Bilan du projet

Le projet de veille technologique nous a permis d'apprendre en conséquence sur le domaine de l'électronique étirable tant d'un point de vue technique que d'un point de vue économique. Ce travail de groupe a permis de développer des compétences comme l'organisation d'un travail conséquent, la recherche bibliographique, la communication au sein d'un petit groupe etc.

Ce projet nous a également fait découvrir des outils pour faire des études de marché tel le diagramme de Porter, la chaîne de valeur ou encore les outils de diagnostic stratégique comme la matrice SWOT.

De plus, l'organisation de ce projet fût entachée par la pandémie de Covid 19. Malgré cela, le groupe a su s'adapter au travail et aux rendus des livrables demandés.

Cependant, nous avons rencontré des difficultés vis-à-vis du cadrage de notre sujet qui s'est avéré être très large, pour finalement se focaliser sur l'électronique imprimée étirable.

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Comparaison électronique traditionnelle et électronique imprimée (Cours Aurore Denneulin Applications Electronique Imprimée 2017-2018)

Figure 2 : Substrat en polymère

Figure 3 : Substrat en papier (110 g/m²)

Figure 4 : Capteur piézorésistif pour la marche et course à pieds

Figure 5 : Fonctionnement d'une OLED

Figure 6 : Tag RFID

Figure 7 : Batterie EnfuCell par la société SoftBattery

Figure 8 : Représentation chimique commune du polyester

Figure 9 : Représentation chimique du PDMS

Figure 10 : Représentation des CNT

Figure 11 : Représentations chimiques (A) du PEDOT:PSS (B) des améliorateurs STEC (C) du triton

Figure 12 : (a) schéma du process de fabrication du capteur d'AgNW avec l'interface PDMS et les couches de passivation. (b) le capteur intégré au textile. (c) le capteur original (haut), le courbé (milieu) et l'étiré (bas)

Figure 13 : Caractéristiques électriques du capteur d'AgNW face aux contraintes de déformation suivant différents nombres d'enrobage d'AgNW : (a) 1-time, (b) 2-times, (c) 3-times, (d) 4-times

Figure 14 : Caractéristiques structurales des films d'AgNW et épaisseur du film suivant le nombre d'enrobage : (a) 1-time : 7 µm, (b) 2-times : 20 µm, (c) 3-times : 43 µm, (d) 4-times : 53 µm

Figure 15 : Schéma du film MBM sur un substrat, formant des structures ondulées avec différentes amplitudes et longueurs d'ondes

Figure 16 : Représentation schématique (C) de la morphologie typique du film de PEDOT:PSS et (D) du film étirable de PEDOT:PSS avec les STEC

Figure 17 : Formules chimiques du sel de sodium dioctylsulfosuccinate (haut), du dodecylbenzensulfonate de sodium (milieu) et de l'acide dodecylbenzenesulfonique (bas)

Figure 18 : (A) conductivité face aux déformations du PEDOT suivant les STEC, (B) conductivité face aux déformations du PEDOT comparé aux conducteurs connus de la littérature

Figure 19 : Stabilité cyclique du PEDOT/STEC sous (C) 50% de déformation et (D) 100% de déformation

Figure 20 : Conductivité des films de PEDOT en fonction des pourcentages en masse de STEC introduits et suivant différents STEC

Figure 21 : Exemple de circuit imprimé flexible

Figure 22 : Chemise de Vélo pour la surveillance de la posture corporelle

Figure 23 : Textile d'éclairage intelligent

Figure 24 : Textile de détection de température, produit développé par Eurecat

Figure 25 : Pistes conductrices extensibles, produit développé par Centi

Figure 26 : Electronique extensible s'adaptant au corps (patches, vêtements), produit développé par Centi

Figure 27 : Capteurs capacitifs imprimés pour intégration dans des substrats flexibles

Figure 28 : Patchs de santé pour cosmétiques

Figure 29 : Capteurs de pression

Figure 30 : Réseau de capteurs imprimés pour casque

Figure 31 : Gilet intelligent

Figure 32 : Luminaire de détection de la qualité de l'air intérieur

Figure 33 : Chargeur sans fil

Figure 34 : Capteur Bluetooth

Figure 35 : Système d'éclairage électroluminescent

Figure 36 : Matrice LED

Figure 37 : Chauffage imprimée

Figure 38 : Etiquette d'emballage intelligent

Figure 39 : Panneaux solaires imprimés

Figure 40 : Panneaux solaire flexibles imprimés sur un toit d'un bâtiment

Figure 41 : Capteur de longueurs d'ondes

Figure 42 : Prévisions économiques du secteur de l'électronique imprimée entre 2020 et 2030 [Source IDTechEx, Déc. 2019]

Figure 43 : le marché de l'industrie de l'électronique imprimée organique et flexible en 2019 [Source IDTechEx, Déc 2019]

Figure 44 : évolution du nombre de produits contenant de l'électronique étirable [Source IDTechEx, Déc 2018]

Figure 45 : Parts de marchés des métaux dans les encres conductrices en 2016 [Source : Business Wire, Mars 2017]

Figure 46 : Diagramme de Porter

Figure 47 : Chaînes de valeurs

Figure 48 : Matrice SWOT

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Comparaison des différents procédés, page 8

Tableau 2 : Conductivité des métaux utilisés en électronique imprimée, page 9

Tableau 3 : Température de fusion des nanoparticules selon leur taille pour différents métaux, page 10

Tableau 4 : Prix des nanoparticules d'argent selon leur taille et l'entreprise les produisant, page 10

Tableau 5 : Conductivité de certains polymères, page 11

Tableau 6 : Taille et prix des différents métaux contenus dans les encres conductrices [Source : Cerig, 2014], page 45

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1]: Anne BLAYO “Materials for functional printing”, cours de deuxième année cycle Ecole d'ingénieurs ingénieur Grenoble INP Pagora 2020 (Consulté le 16/02/2020)

[2]: Aurore DENNEULIN “Électronique imprimée - Applications”, cours de deuxième année Ecole d'ingénieurs Grenoble INP Pagora 2019, (consulté le 16/02/2020)

[3]: Mathieu FENOLL, “ Optimisation des paramètres d'impression pour l'électronique imprimée sur supports souples. “ Génie des procédés. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2007 [En ligne] disponible sur <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00176225>, (Consulté la dernière fois le : 01/04/2020)

[4]: Nadège REVERDY-BRUAS « Screen-Printing dedicated to printed electronics Application », cours de deuxième année Ecole d'ingénieurs ingénieur Grenoble INP Pagora 2020

[5]: Saleem KHAN, Leandro LORENZELLI, Ravinder S. DAHIYA, “Technologies for Printing Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrates: A Review”, IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 15, NO. 6, JUNE 2015

[6]: D'ORTOLI Jordan et MAZOUIN Antoine, “Encres conductrices à base de cuivre”, mai 2014 http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/memoire/2015/encre-conductrice-cuivre.htm#map-encre-conductrice-cuivre_techinique (Consulté le 20/04/2020)

[7]: VFP Ink Technologies, « Silver electron – Encre conductrice », [En ligne] documentation disponible sur le site de la société : <http://vfp-ink-technologies.fr/wp-content/uploads/sites/6/2016/02/Gamme-Silver-Electron-SE-Electronique-imprimée-encres-et-verniss-VFP-Ink-Technologies.pdf> (Consulté le : 02/06/2020)

[8] : Carmen CANTUARIAS-VILLESUZANNE, Pierre BOUCARD, Myriam MERAD, Dominique GUIONNET,

Guillaume FAYET, Alexis VIGNES, INERIS, « Etude de l'utilisation de nano-argent », septembre 2016, <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/r-drc-16-157037-04739b-nano-argent-vf-1483450982.pdf> (Consulté le : 02/06/2020)

[9]: Amandine BOGENEZ, Sophie LIEBER, « Encre conductrices », Grenoble INP Pagora, mai 2004 <<http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/memoire/2004/encres-conductrices.htm>> (Consulté le 03/05/2020)

[10]: Basile BONADEO, Fanny ROUMET, « Encres transparentes conductrices et applications », Grenoble INP Pagora, avril 2013, [En ligne] disponible sur <http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/memoire/2013/encre-transparente-conductrice.htm> (Consulté le : 27/05/2020)

[11]: Pascale LAUNOIS, Directeur de recherche CNRS, cours « Les nanotubes de carbone », Université Paris Saclay, https://www.lps.u-psud.fr/IMG/pdf_LesNTC.pdf (Consulté le 24/05/2020)

[12]: VFP Ink Technologies, Documentation en ligne disponible sur : <https://poly-ink.fr/index.php/fr/our-products/poly-ink-hc.html>, (Consulté la dernière fois le 23/05/2020) (Consulté le : 20/05/2020)

[13]: Rita FADDOUL “Procédés d'impression dédiés à la production de masse de microcomposants électroniques à base de céramique”, 2012, PhD, Université de Grenoble. [En ligne] disponible sur :

https://tel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/858909/filename/PhD_CR_2.pdf (Consulté la dernière fois le : 02/04/2020)

[14]: Ines KHARRAT “Modélisation et réalisation d'un système de récupération d'énergie imprimé Caractérisation hyperfréquence des matériaux papiers utilisés.”, 2006, Université de Grenoble [En ligne] disponible sur : <http://www.theses.fr/2014GRENT106> (Consulté la dernière fois le : 04/04/2020)

[15]: Jae Sang Heo, Hossein Hamidi Shishavan, Rahim Soleymanpour, Jiwon Kim, and Insoo Kim, Members IEEE, “Textile-Based Stretchable and Flexible Glove Sensor for Monitoring Upper Extremity Prosthesis Functions”, *IEEE Sensors Journal*. (Consulté le 15/02/2020) Volume 20, numéro 4, p.1754-1760.

[16]: Yue Wang, Chenxin Zhu, Raphael Pfattner etc, Members IEEE, “A highly stretchable, transparent, and conductive polymer”, *Science advances*. 10/03/2017, Volume 3. (Consulté le 15/02/2020)

[17]: Wei Wu, “Stretchable electronics: functional materials, fabrication strategies and applications”, *Science and Technology of Advanced Materials*, 2019, Volume 20, numéro 1, p.187-224, URL: <https://doi.org/10.1080/14686996.2018.1549460> (Consulté le 15/03/2020)

[18]: PEDOT:PSS for Flexible and Stretchable Electronics: Modifications, Strategies, and Applications, Xi Fan, 30 July 2019 <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adv.201900813>> (Consulté le 18.02.2020)

[19]: To find technology / business providers, display your flexible and wearable technologies <<https://marketplace.smartees2.eu/>> (Consulté le 25.03.2020)

[20]: Flexible printed solar cells – a new manufacturing frontier <<https://energypost.eu/printed-flexible-solar-cells-new-manufacturing/>>

DEBUT ILIANA ECO

[21] : BOEUF Thomas, DUBILE Maria et MANTEL Anatole, « Le SmartGlass pour le vitrage intelligent : les apports de l'électronique imprimée », 2019. (Consulté le 04/04/2020)

[22]: DAS Raghu, "Printed, Organic and Flexible Electronics 2020-2030: Forecasts, Technologies, Markets", IDTechEx Research, décembre 2019, <https://www.idtechex.com/en/research-report/printed-organic-and-flexible-electronics-2020-2030-forecasts-technologies-markets/687> (Consulté le 12/05/2020)

[23] : Dr GHAFFARZADEH Khasha, HAYWARD James et Dr HE Xiaoxi, "Stretchable and conformal electronics 2019-2029", IDTechEx Research, décembre 2018, <https://www.idtechex.com/en/research-report/stretchable-and-conformal-electronics-2019-2029/636> (Consulté le 12/05/2020)

[24] : Unknown, "Global Conductive Inks Market Driven by Rising Demand for Advanced and Compact Electronic Devices", Technavio Research, mars 2017, <https://www.businesswire.com/news/home/20170328005470/en/Global-Conductive-Inks-Market-Driven-Rising-Demand> (Consulté le 20/04/2020)

[25] : Responsables scientifiques internationaux, The Intergovernmental Panel on Climate Change, rapport 2019 : < <https://www.ipcc.ch/languages-2/francais/>> (Consulté le 27/04/2020)

[26]: Association française de l'électronique imprimée, Environnement, Matériaux, Procédés <http://www.afelim.fr/> (Consulté le 27/04/2020)

[27]: Norme Générique de Conception du Circuit imprimé, IPC-2221B, Novembre 2012 : <http://www.ipc.org/TOC/IPC-2221B-French-toc.pdf> (Consulté le 27/04/2020)