

RAPPORT – PROJET TUTORÉ

Électronique sur support souple



L3 SPI-SDE 2015/2016

UE5 : Projet tutoré

SOMMAIRE

Sommaire	2
Introduction	3
I. Historique et état de l'art.....	4
1. Histoire de l'électronique flexible.....	4
2. Les approches de l'électronique sur support souple.....	5
II. Les applications.....	6
1. Transistor OFET (Transistor à Effet de Champ Organique).....	6
2. Photovoltaïque organique.....	9
3. Technologie OLED	11
4. Technologie RFID.....	13
5. Capteurs.....	15
III. La fabrication	17
1. L'impression électronique.....	17
2. Autres étapes de fabrication	21
IV. Les limitations des supports souples	22
Conclusion.....	23
Références	24

INTRODUCTION

Dans le cadre du module « projet tutoré » à l'Université d'Aix-Marseille nous avons pour travail de faire une synthèse du sujet « électronique sur support souple ».

Ce sujet s'inscrit dans la tendance de recherche actuelle, à chercher de nouveaux matériaux et de nouvelles méthodes de fabrication pour la microélectronique. Ces nouveautés permettent pour la plupart une certaine flexibilité du circuit final.

Nous verrons dans ce rapport quels sont les enjeux et limites de l'électronique sur support souple, ainsi que quelques exemples d'applications et leurs méthodes de fabrication.

I. HISTORIQUE ET ETAT DE L'ART

1. HISTOIRE DE L'ELECTRONIQUE FLEXIBLE

L'idée de construire des circuits électroniques souples remonte au début du 20^e siècle, en 1903, Albert Hansen (un Berlinois vivant à Londres) dépose un brevet en Angleterre décrivant un circuit flexible constitué de conducteurs métalliques plats déposés sur du papier enduit de paraffine (distillat obtenu lors du raffinage du pétrole). Le but était alors de répondre au besoin grandissant de lignes téléphoniques.

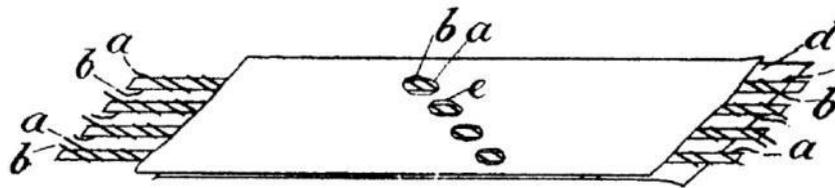


FIGURE 1 - SCHEMA DU CIRCUIT FLEXIBLE LE "PRINTED WIRE" D'HANSEN - SOURCE : THE CIRCUIT CENTENNIAL

Mais si l'on est encore loin du circuit imprimé, Hansen avait déjà compris que son invention permettrait une densité élevée de liaison, et avait ajouté des innovations telles que des couches multiples ou des trous permettant de connecter différentes couches ensemble (via).

Les cahiers de laboratoire de l'inventeur Thomas Edison datant de la même époque montrent qu'il s'intéressait aussi au sujet. Edison réfléchissait à mettre de la poudre de graphite dans du papier enrobé de gomme de cellulose (carmellose).

Les premiers circuits flexibles étaient réalisés de façon additive, c'est-à-dire que des conducteurs étaient déposés sur un substrat isolant. C'est la méthode la plus évidente, néanmoins le secteur de l'imprimerie était habitué à réaliser les plaques d'impression de manière soustractive. À ses débuts, du bois était taillé, puis rapidement le passage à la gravure du métal s'est mis en place, la gravure par acide étant bien connue.

En 1913, Arthur Berry dépose un brevet en Angleterre décrivant une méthode de fabrication de circuit où du cuivre est déposé sur un substrat et ensuite gravé pour former les liaisons électriques.

En 1925, Charles Ducas dépose un brevet en Angleterre décrivant des procédés de gravure et de plaquage, mais aussi des circuits imprimés multicouches ainsi que des méthodes pour la connexion de ces différentes couches.

Néanmoins ces procédés ne seront pas utilisés avant plusieurs décennies, à cause de leur complexité et de leur coût, en effet il était plus simple de câbler les circuits à la main. La véritable première apparition des circuits imprimés date de l'invention du transistor et plus tard de l'invention du circuit intégré.

Jusqu'à peu, l'électronique sur support souple se résumait à souder des composants classiques sur un substrat qui lui était souple.

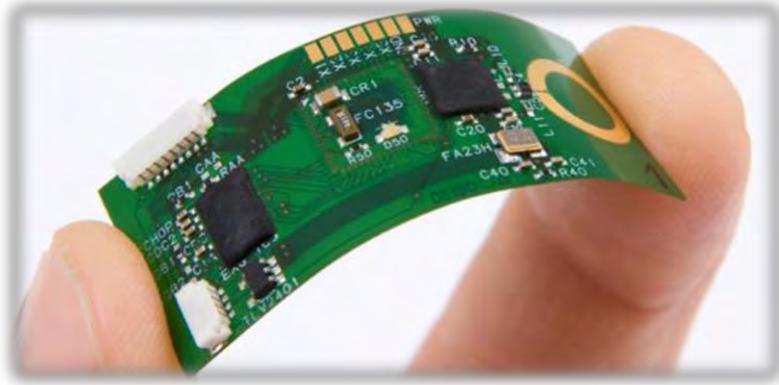


FIGURE 2 - ELECTRONIQUE CLASSIQUE SUR SUBSTRAT SOUPLE - SOURCE : BUSINESSKOREA.CO.KR

Ce genre de circuit est très utile pour les appareils portables ou embarqués où des contraintes de taille et de forme existent.

Mais ces dernières années un domaine de recherche à émergé : celui visant à intégrer des composants au sein même du substrat souple.

2. LES APPROCHES DE L'ELECTRONIQUE SUR SUPPORT SOUPLE

L'électronique sur support souple se divise donc en deux filières :

- utilisations de composants électroniques standards collés ou soudés sur un substrat souple
- composants électroniques fabriqués directement sur un substrat souple

Dans ce rapport nous traiterons de la deuxième filière qui est aujourd'hui en pleine croissance.

II. LES APPLICATIONS

1. TRANSISTOR OFET (TRANSISTOR A EFFET DE CHAMP ORGANIQUE)

1.1 INTRODUCTION

Les transistors sont des composants fondamentaux dans les circuits modernes, ils sont utilisés pour amplifier des signaux ou comme simples interrupteurs.

Un transistor à effet de champ organique (OFET) est un transistor à effet de champ utilisant des matériaux organiques pour son canal semi-conducteur, et parfois aussi pour son isolant, son substrat et même ses électrodes.

La motivation de réussir à produire un OFET ne réside pas dans ses performances, puisque la mobilité de ses porteurs de charge est bien plus faible que celle d'un transistor classique. Mais elle réside dans le fait que l'OFET promet d'avoir un coût faible, d'être plus simple à fabriquer (le génie chimique pouvant mettre au point des molécules qui s'auto-assemblent, ne nécessitant pas forcément de salles blanches, et les composants pouvant être imprimés) d'être léger et même flexible, en plus d'être plus respectueux de l'environnement.

1.2 FONCTIONNEMENT

Les OFET comme tous les transistors à effet de champ sont composés de trois bornes, la source, le drain et la grille en plus d'une couche de semi-conducteur et d'une couche d'isolant entre la grille et la couche de semi-conducteur.

La géométrie la plus utilisée est celle avec la grille en bas et les électrodes de source et de drain sur le haut.

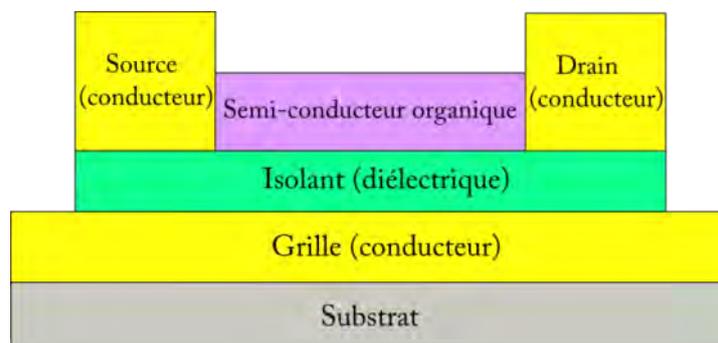


FIGURE 3 - STRUCTURE TYPIQUE D'UN TRANSISTOR OFET

Une tension est appliquée sur la grille pour commander la quantité de courant circulant entre la source et le drain.

Dans un OFET de type P, qui est la variété la plus courante des OFET en raison de la mobilité relativement élevée de trous dans les semi-conducteurs organiques (plus élevée que celle des

électrons dans un type N), une tension négative supérieure en amplitude à la tension de seuil du matériau semi-conducteur est appliquée entre la grille et la source.

Cela conduit à la formation d'un canal de type P entre la source et le drain à l'interface entre l'isolant et le semi-conducteur.

1.3 MATERIAUX UTILISES

L'isolant de grille peut être de l'oxyde de silicium SiO_2 créé par croissance thermique ou encore un polymère organique comme du poly(méthyl-méthacrylate) (PMMA, aussi connu sous le nom de plexiglas).

Un polymère organique est constitué de grosses molécules qui possèdent de longues chaînes organiques plus petites.

En fonction de la structure du matériau, ils peuvent être isolants, conducteurs ou semi-conducteurs. Les propriétés isolantes des matières organiques, notamment des polymères, sont utilisées depuis longtemps dans les applications électroniques, par exemple pour des gaines isolantes de câble.

Typiquement, ces polymères organiques sont basés sur des chaînes d'atomes de carbone combinés avec des atomes d'hydrogène.

Les chaînes conjuguées comportent une alternance de liaisons simples et doubles entre les atomes de carbone qui se traduisent par des états électroniques délocalisés; dans ce cas, le polymère est semi-conducteur.

FIGURE 4 - COMPARAISON AVEC LES SEMI-CONDUCTEURS INORGANIQUES

Semi-conducteur inorganique	Semi-conducteur organique
Bande de valence	HOMO (highest occupied molecular orbital)
Bande de conduction	LUMO (lowest unoccupied molecular orbital)

Comme les semi-conducteurs inorganiques, les semi-conducteurs organiques peuvent être dopés, c'est-à-dire introduire, dans leurs matrices, des atomes d'un autre matériau en vue de modifier leurs propriétés de conductivité.

Concernant la couche de semi-conducteur organique, le choix de matériaux est très grand, le plus populaire est le rubrène (hydrocarbure aromatique polycyclique $\text{C}_{42}\text{H}_{28}$) puisqu'il est connu pour avoir la mobilité de porteurs de charges la plus élevée des semi-conducteurs organiques.

Le pentacène est également un choix populaire dans la recherche à cause de sa mobilité des trous relativement élevée (supérieure à celle du silicium amorphe).

D'autres matériaux peuvent être utilisés comme le tétracène, ou encore un grand nombre de polythiophènes (PT) comme le PEDOT-PSS.

Le substrat peut quant à lui bien sûr être un substrat de silicium classique ou même du verre mais nous perdons l'avantage de la flexibilité et de la légèreté, pour éviter cela des matériaux plastiques peuvent être utilisés.

Le kapton est le matériau de choix pour cette application en raison de sa stabilité dans une large gamme de températures et de ses capacités isolantes.

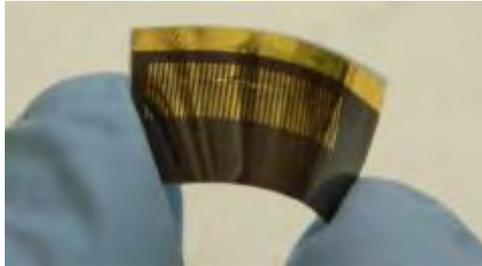


FIGURE 5 - PHOTO D'UN OFET SUR SUBSTRAT KAPTON - SOURCE : RESEARCHGATE.NET

Un autre matériau beaucoup utilisé comme substrat flexible est le mylar, aussi connu sous le nom de PET (poly(téréphtalate d'éthylène)). Ce dernier offre une bonne flexibilité et peut être utilisé à la fois comme substrat et comme isolant de grille.

2. PHOTOVOLTAÏQUE ORGANIQUE

1.1 INTRODUCTION

Une cellule solaire organique est un type de cellule solaire flexible réalisée avec des matériaux organiques comme les polymères, de grandes molécules ayant des unités structurales périodiques, qui produisent de l'électricité à partir de la lumière du soleil par l'effet photovoltaïque.

Ces cellules solaires sont formées avec des macromolécules organiques, dont les procédés de fabrication sont bien moins consommateurs en énergie que ceux des cellules solaires traditionnelles. Leur coût est également bien plus faible et elles sont plus légères et moins fragiles voir flexibles, ce qui les rend aptes à s'intégrer à des matériaux souples tel que des fibres textiles. Leur développement peut tirer parti du génie chimique pour dans l'auto-assemblage des molécules par exemple. Leur principale faiblesse réside dans leur durée de vie faible ce qui est dû à la dégradation des polymères lorsqu'ils sont exposés au rayonnement du soleil.

1.2 FONCTIONNEMENT

La base du fonctionnement des cellules solaires organiques est le même que celle des cellules solaires traditionnelles (lorsqu'un photon entre dans la jonction P-N, création d'une paire électron-trou) mais elle fait intervenir en plus des orbitales moléculaires, certaines jouant le rôle de bande de valence, d'autres de bande de conduction, entre deux espèces moléculaires distinctes, l'une servant de donneur d'électrons et l'autre d'accepteur, organisées autour d'une hétérojonction (similaire à la jonction P-N des semi-conducteurs classiques).

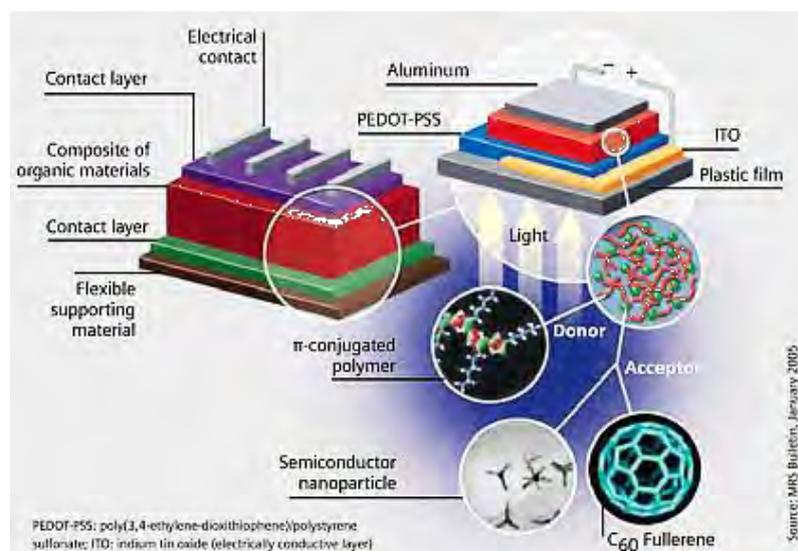


FIGURE 6 - SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DE LA CELLULE SOLAIRE ORGANIQUE - SOURCE : MRS BULLETIN

1.3 MATERIAUX UTILISES

Les molécules de dioxygène se trouvant dans l'air agissent comme des centres de recombinaison électron-trou, dégradant les performances électroniques des cellules solaires, il faut donc les recouvrir d'un matériau protecteur, celui-ci est bien souvent le poly(éthylène-naphtalate) (PEN).

Concernant la jonction P-N, le fullerène C_{60} est beaucoup utilisé comme accepteur d'électrons (type N) et le polymère PEDOT-PSS comme donneur d'électrons (type P).

Actuellement les recherches portent beaucoup sur des dérivés de polythiophènes comme polymères de type P et des dérivés de fullerène comme accepteurs (type N). En raison de leur faible largeur de bande interdite, des copolymères (au moins deux motifs de répétition) font leur apparition dans les cellules solaires organiques de haute performance, comme le PCDTBT/PCBM.

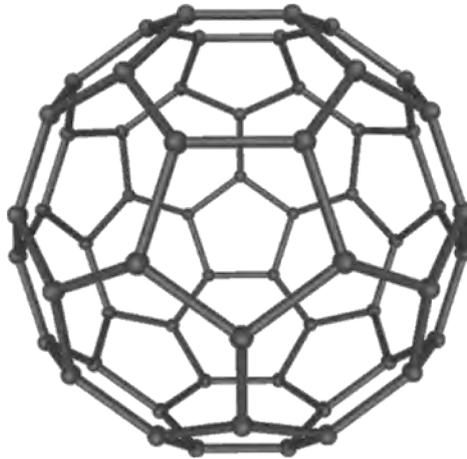


FIGURE 7 - LE FULLERENE C_{60} , NANOPARTICULE SOUVENT UTILISEE DANS L'ELECTRONIQUE ORGANIQUE

3. TECHNOLOGIE OLED

Une OLED (Organic Light-Emitting Diode), ou diode électroluminescente organique, est un composant d'affichage ou d'éclairage. Relativement récente, cette technique s'est peu à peu imposée en raison de la qualité d'affichage qu'elle procure, de l'économie d'énergie apportée, et dans notre cas sur ses possibilités d'application pour des écrans souples.

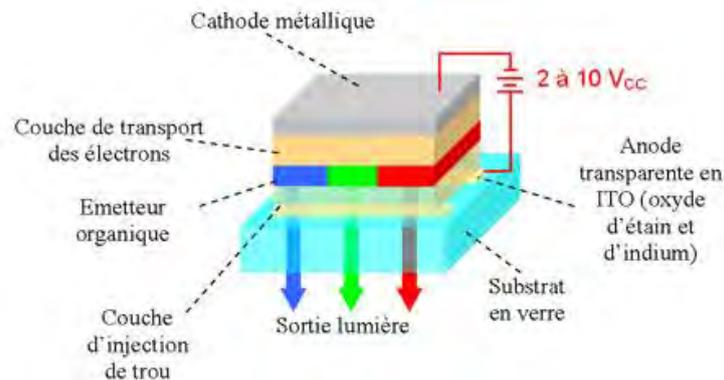


FIGURE 8 - SCHEMA D'UNE OLED- SOURCE : ECRANFLEXIBLE.COM

Le fonctionnement d'une OLED repose sur la superposition de trois diodes émettant chacune leur propre lumière, les trois longueurs d'onde émises étant celles du bleu, vert et rouge. Cela correspond donc à un pixel, dont la couleur sera la résultante de la lumière émise par chaque diode. Ces dernières sont des semi-conducteurs organiques, c'est-à-dire à base de carbone et hydrogène.

Une anode (positive) et une cathode (négative) encerclent les diodes afin d'y appliquer une différence de potentiel. La cathode est un métal, tandis que l'anode est un oxyde d'étain et d'indium (ITO). Ce dernier est transparent et permet ainsi le passage des rayons lumineux vers l'écran d'affichage.

Les électrons, générés par la cathode, et les trous, générés par l'anode, vont s'attirer jusqu'à se recombiner dans le matériau semi-conducteur. La recombinaison radiative entre les deux charges donne un exciton possédant de l'énergie, qui sera ensuite libérée sous forme d'un photon lumineux correspondant à la longueur d'onde de la diode émettrice.

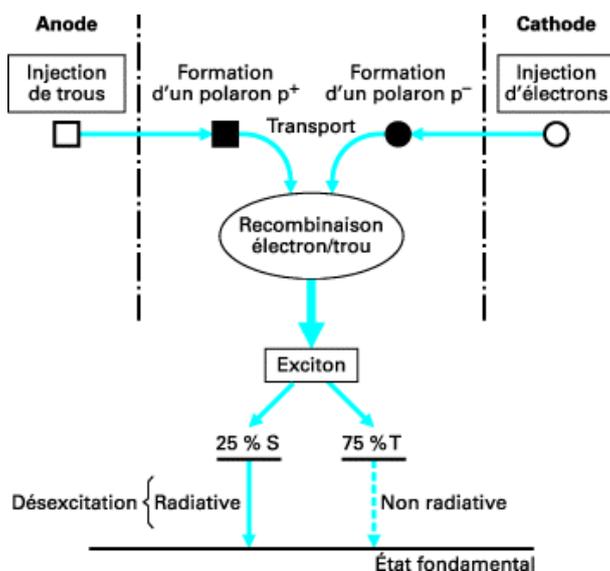


FIGURE 9 - DIAGRAMME ENERGETIQUE DE FONCTIONNEMENT D'UNE OLED - SOURCE : PAGORA.GRENOBLE-INP.FR

Les deux couches de transports des électrons et des trous (Fig8) ont la propriété d'apporter une grande mobilité à chacune des charges (respectivement les électrons et les trous). Il s'agit de matériaux organiques.

Pour afficher une image il nous faut donc un ensemble de diodes électroluminescentes qui forme chacune un pixel en émettant leur propre lumière, à la différence de la technologie LCD qui nécessite un rétroéclairage.

L'ensemble repose sur un substrat transparent, correspondant à l'écran, qui peut être en verre ou en plastique. Ce dernier matériau est celui qui nous intéresse dans le cadre des supports souples. Il permet l'élaboration d'écran OLED flexibles et se présente sous la forme de feuilles de plastique souples, généralement le polymère PET (Polytéréphtalate d'éthylène). On parle alors de FOLED (Flexible OLED).

Les techniques de dépôt utilisées sont principalement le spin coating et l'évaporation sous vide. Cependant la plus développée et utilisée est l'impression par jet d'encre. Elle a l'avantage d'être peu coûteuse et de permettre un dépôt précis des différentes couches nécessaires dans l'élaboration des OLED.

La principale difficulté technique dans la réalisation d'un écran flexible vient de l'utilisation de l'oxyde d'indium-étain pour l'anode. En effet, celui-ci doit être déposé en couches minces afin de conserver sa transparence, le rendant ainsi fragile à la flexion. De plus, sa rareté et son coût restent un frein à son utilisation. C'est pourquoi une solution de remplacement est à l'étude. Il s'agit d'un film de polymère organique, le PET enrobé de nanotubes de carbone.

4. TECHNOLOGIE RFID

L'identification par radiofréquence (RFID) est une technologie d'identification d'étiquettes attachées à des objets utilisant des champs électromagnétiques. Les étiquettes contiennent des informations stockées sur support électronique. Les étiquettes reçoivent l'énergie nécessaire à leur fonctionnement soit à partir des ondes radio d'un lecteur RFID à proximité soit à partir d'une source auxiliaire comme une batterie.

Les étiquettes RFID sont utilisées dans de nombreuses industries, par exemple, une étiquette RFID attachée à une voiture lors de la production peut être utilisée pour suivre sa progression à travers la ligne d'assemblage ou encore une carte RFID peut permettre à des personnes la possédant de déverrouiller un verrou électrique.

Ces puces RFID peuvent avoir des tailles et des formes très variées, la seule contrainte vient de la taille dans l'antenne qui récupère l'énergie électromagnétique : si elle est petite il faudra placer l'étiquette RFID très proche du lecteur pour permettre son fonctionnement.



FIGURE 10 - COMPARAISON DE LA TAILLE D'UNE PUCE RFID IMPLANTABLE CHEZ UN ETRE VIVANT ET UN GRAIN DE RIZ

Une étiquette RFID se compose de deux éléments principaux, une antenne et un circuit intégré pour le stockage et le traitement des données, moduler et démoduler le signal radiofréquence et pour la collecte d'énergie à partir du signal du lecteur.

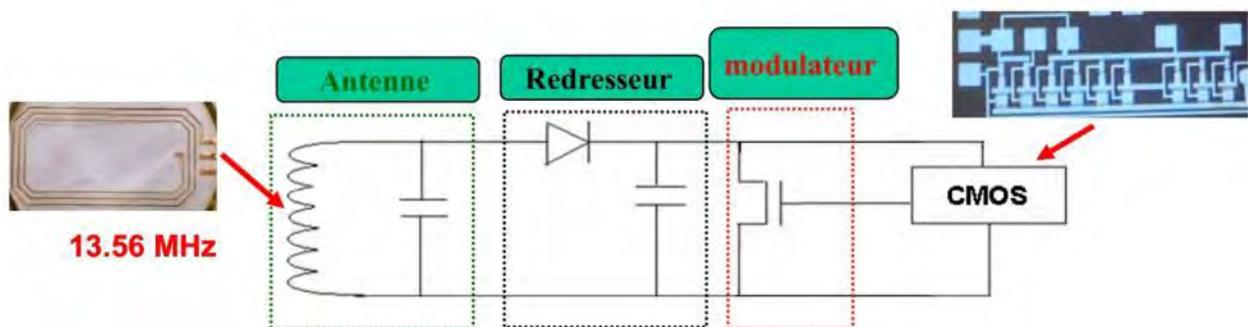


FIGURE 11 - SCHEMA D'UNE ETIQUETTE RFID - SOURCE : ENOVA LYON TAYEB MOHAMMED

Le lecteur RFID transmet un signal radio pour interroger l'étiquette, celle-ci reçoit le message, puis répond avec son identification et d'autres informations. Cela peut être seulement un numéro de série unique, mais aussi des informations relatives au produit, comme un numéro de lot, une date de production, etc.

L'étiquette RFID est constituée d'un support isolant, souvent souple (papier, PET, PVC, polyimide, kapton...), d'une antenne réalisée sur le support (conducteur en aluminium, cuivre ou encre à l'argent), ainsi que d'un circuit intégré.

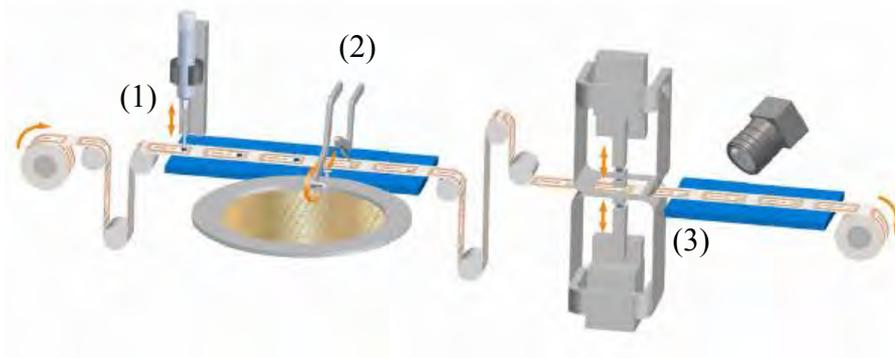


FIGURE 12 - ILLUSTRATION DU PROCESSUS D'ASSEMBLAGE DU CŒUR RFID : UN ADHESIF EST APPLIQUÉ (1), ENSUITE LA PUCE EST PLACÉE (2) ET ENFIN LA FIXATION EST RÉALISÉE THERMIQUEMENT (3) - SOURCE : IDSPACKAGING.COM

Les étiquettes RFID sont très flexibles, bien qu'intégrant un circuit intégré classique en silicium, cela est dû à la taille de ce dernier qui est minuscule, ce qui autorise de très faibles rayons de courbure pour l'étiquette globale.

5. CAPTEURS

Les technologies d'électronique sur support souple ont ouvert la porte à toutes sortes de capteurs ultraminces, pouvant être attachés au corps humain, dans les vêtements, ou sur les emballages des produits alimentaires.

1.1 CAPTEURS DE GRANDE TAILLE

Dans le domaine médical, un outil très important pour établir des diagnostics de santé d'un patient est l'imagerie à rayons X. L'imagerie à rayon X n'est pas encore entièrement démocratisé malgré ses nombreux avantages, développer des capteurs à rayons X de grande taille sur substrat flexible permettra en plus un usage portable.

1.2 CAPTEURS DE SOUFFLE ET DOSIMETRE

Au cours des dernières années, de plus en plus de soldats souffrent de traumatisme du cerveau dû à l'exposition à un grand nombre de souffle d'explosion dans le champ de bataille. Afin de comprendre l'effet des explosions sur le cerveau humain, les chercheurs développent des capteurs qui permettent de mesurer l'onde de choc, ainsi que la direction d'où elle vient.

1.3 CAPTEUR DE TEMPERATURE CORPORELLE DE DE POULS

De nombreux efforts sont fournis en vue de développer des patches pouvant être placés sur le corps humain, et renouvelés quotidiennement, afin de monitorer l'état de santé de l'utilisateur et parfois même d'établir des pronostics.

Les dispositifs permettant de relever la température sont des thermistances, en WO_3 ou ZnO et ceux permettant de relever le rythme cardiaque sont de simples capteurs de pressions, de type tout ou rien pour les plus simples et construit dans un métal comme le platine, le cuivre ou l'argent.

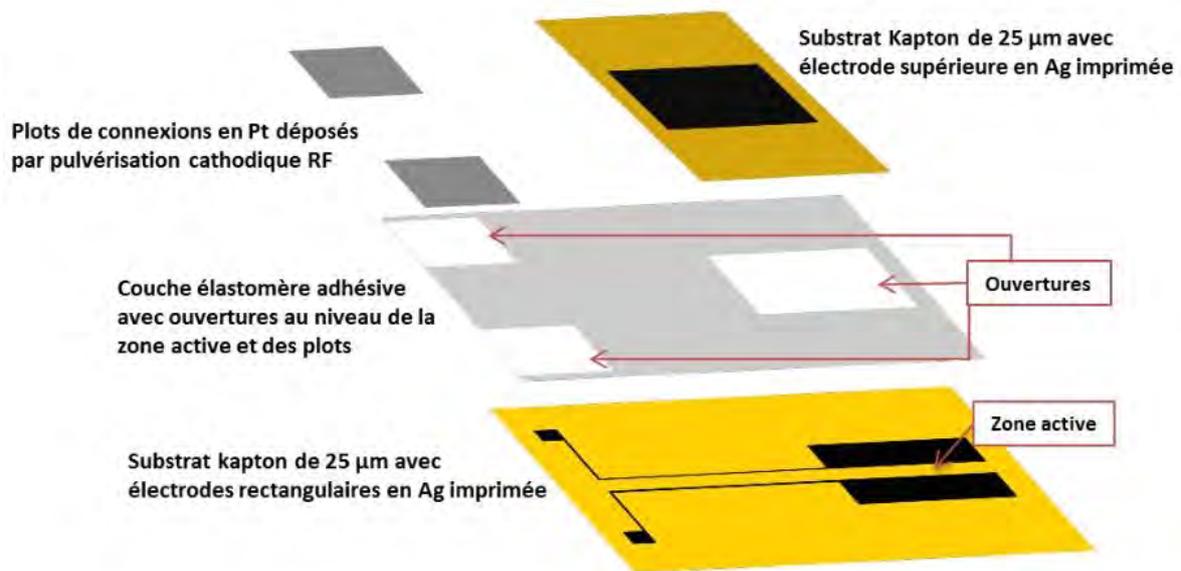


FIGURE 13 - EXEMPLE DE CAPTEUR DE RYTHME CARDIAQUE TOUT OU RIEN - SOURCE : M. DANKOCO, CONCEPTION ET REALISATION DE CAPTEURS SUR SUPPORT SOUPLE

1.4 CAPTEUR DE GAZ

De nombreux matériaux peuvent être imprimés sur support souple afin de détecter certains gaz. De nombreux polymères comme le PANI, le PTh, le PA, le PPV, le PPy, PPP ou encore le PF offrent de bonnes performances de détection de gaz. Malheureusement toutes les propriétés intéressantes de ces molécules se dégradent fortement avec l'humidité.

Pour ce genre d'application, qui peut toucher à la détection de gaz nocifs pour l'être humain, on préférera donc utiliser des oxydes de métaux comme ZnO, WO₃, ITO, SnO₂, TiO₂ ou encore ZnS.

La détection du gaz consiste à mesurer la variation de conductivité thermique de l'atmosphère provoquée par la présence de gaz cible. L'élément sensible est constitué d'un fil chauffé électriquement. Le matériau sensible doit être à haute température (plus de 350°C), il faut donc que tous les matériaux du capteur soient compatibles avec de telles températures.

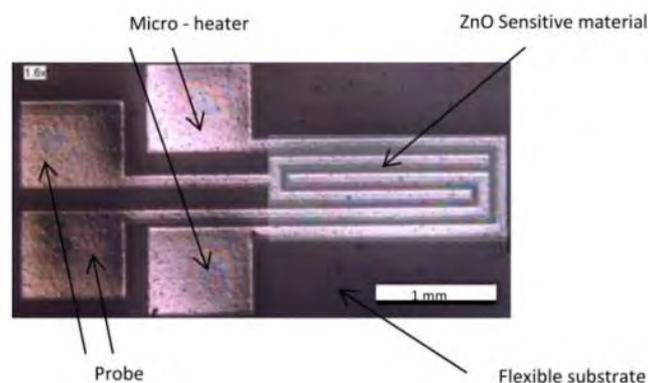


FIGURE 14 - PHOTO DU CAPTEUR DE GAZ AU ZnO - SOURCE : M. ACUAUTLA, DEVELOPMENT OF OZONE AND AMMONIA GAS

III. LA FABRICATION

Les systèmes électroniques conventionnels sont fabriqués avec des éléments conducteurs faits de métaux ou d'oxydes de métaux sur des substrats rigides, généralement passant par un processus à haute température.

La transition vers l'électronique flexible requiert la création de circuits qui peuvent rester fonctionnels lorsqu'ils sont tordus, pliés ou enroulés.

L'utilisation de plastiques flexibles comme substrats exempts l'utilisation de processus de fabrication à haute température, sous peine de déformer le substrat.

Le challenge est donc de trouver des matériaux et des procédés de fabrication qui peuvent surmonter ces limites physiques.

1. L'IMPRESSIION ELECTRONIQUE

L'impression de circuit électronique directement sur substrat souple semble être la technique la plus appréciable, en effet c'est une technologie additive, c'est-à-dire que l'on ajoute de la matière pour former un motif contrairement à la gravure par exemple qui en retire, et donc les pertes de matières sont minimales.

Cela ouvre aussi la porte de méthodes de fabrication peu couteuses, et sur de bien plus grandes surfaces que les habituels wafers.

1.1 LA SERIGRAPHIE

La sérigraphie est la technique d'impression la plus utilisée pour l'électronique, elle est utilisée depuis longtemps dans l'industrie du circuit imprimé pour appliquer de la pâte à souder uniquement aux emplacements des composants sur les circuits imprimés. Elle est également utilisée dans l'industrie du textile pour imprimer des motifs sur des t-shirts par exemple.

C'est une technique plus rapide et plus souple que les autres techniques d'impression, elle consiste simplement en un pochoir, un système de presse, un système de racloir et le substrat sur lequel imprimé.

Deux dispositions différentes sont utilisées pour la sérigraphie, la sérigraphie à plat et la sérigraphie rotative, la dernière permet des cadences d'impression industrielles.

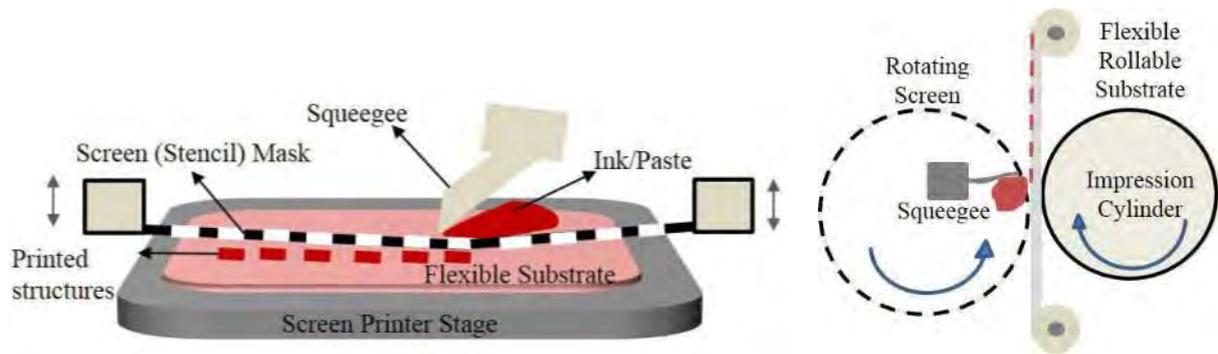


FIGURE 15 - LES DEUX DISPOSITIONS POSSIBLES DE SERIGRAPHIE - SOURCE : S. KHAN ET AL., TECHNOLOGIES FOR PRINTING SENSORS AND ELECTRONICS OVER LARGE FLEXIBLE SUBSTRATE: A REVIEW

Pour la sérigraphie à plat, l'encre ou le matériau à imprimer est pressé sur le pochoir par un racloir, ce qui résulte en son transfert à travers les ouvertures du pochoir sur le substrat en dessous. La sérigraphie rotative se base sur le même procédé, mais utilise des rouleaux pour permettre une automatisation du processus et des vitesses plus grandes.

La faisabilité d'utiliser la sérigraphie pour l'électronique souple a été démontré pour un certain nombre de capteurs imprimés, de circuits et composants électroniques tels que des capteurs de pression (Fig16), des afficheurs OLED ou encore des circuits imprimés multicouches interconnectée à l'aide de micros-via et pouvant même intégrer des composants passifs.

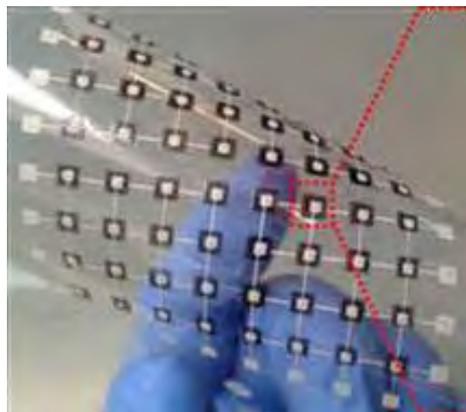


FIGURE 16 - CAPTEUR DE PRESSION IMPRIME PAR SERIGRAPHIE - SOURCE : S. KHAN ET AL., TECHNOLOGIES FOR PRINTING SENSORS AND ELECTRONICS OVER LARGE FLEXIBLE SUBSTRATE: A REVIEW

1.1 L'OFFSET LITHOGRAPHY

L'offset lithography (ou impression offset) est une technique d'impression pour laquelle l'image est transférée d'un premier cylindre en métal vers un blanchet (étouffe) cylindrique en caoutchouc, puis vers la surface sur laquelle imprimer.

Le motif à imprimer est gravé dans le premier cylindre plaqué en cuivre, et l'encre y est placée lors de la rotation du cylindre dans un réservoir ou via une buse de distribution.

Le blanchet élastique récupère ensuite l'encre à partir des rainures du premier cylindre, et le transfère finalement sur le substrat.

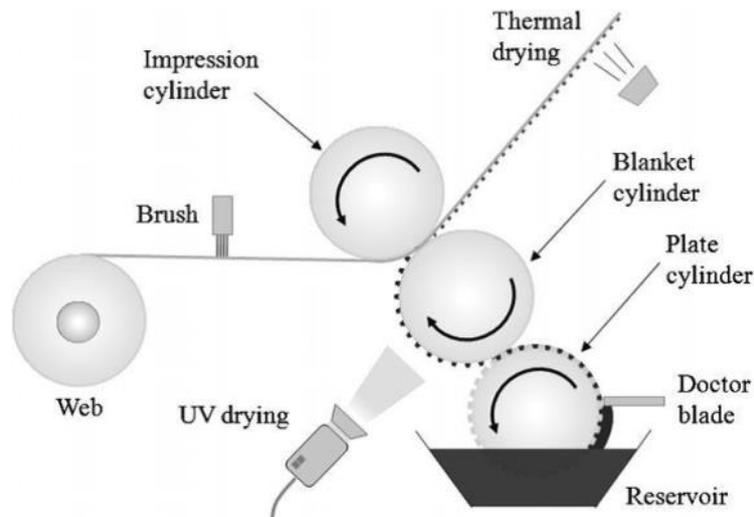


FIGURE 17 - SCHEMA DE L'OFFSET LITHOGRAPHY - SOURCE : S. KHAN ET AL., TECHNOLOGIES FOR PRINTING SENSORS AND ELECTRONICS OVER LARGE FLEXIBLE SUBSTRATE: A REVIEW

Plusieurs facteurs sont impliqués dans le transfert de l'encre, dont la force d'adhérence entre le blanchet et l'encre, la force de cohésion au sein de l'encre, la force d'adhérence entre l'encre et le premier cylindre sur lequel le motif est gravé et la force d'adhérence entre l'encre et le substrat. Le but final est d'atteindre un transfert d'encre total afin de ne pas avoir de cassure dans le motif.

Les paramètres principaux sur lesquels nous pouvons jouer sont les vitesses de rotation des cylindres et la pression qui existe entre eux.

1.2 LE JET D'ENCRE

L'impression jet d'encre est une technique en pleine émergence, le matériau est déposé à travers une buse de taille micrométrique directement sur le substrat.

La buse est montée sur une tête d'impression pouvant se déplacer sur les deux dimensions au-dessus de toute la surface du substrat.

Cette technologie est bien sûr additive, et elle a l'avantage de ne produire aucune perte de matière, en effet seule la dose de matériau voulue est distribuée. Elle autorise également un cycle conception-fabrication très rapide, en effet il n'y a pas besoin de réaliser de masques ou pochoirs coûteux, les données sont numériques et peuvent être ajustées à la demande.

Et enfin c'est une technologie sans contact, ce qui empêche une usure ou salissure éventuelle du système d'impression.

La technique la plus importante est celle de la goutte à la demande (Drop-on-Demand, DoD), elle consiste à éjecter des gouttes de très petite taille à l'aide d'actionneurs piézoélectriques ou thermiques.

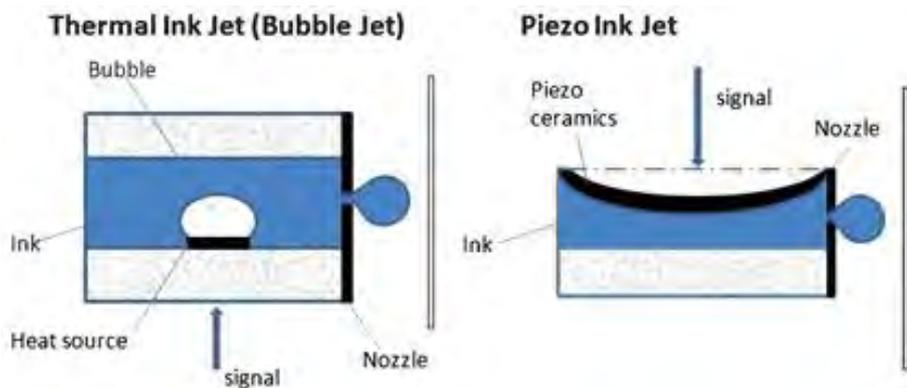


FIGURE 18 - SCHEMA DES DEUX TECHNIQUES DE GOUTTE A LA DEMANDE, THERMIQUE ET PIEZOELECTRIQUE - SOURCE : WENG, B. AND SHEPHERD, PRINTING CONDUCTING POLYMERS

L'impression jet d'encre a été utilisée pour fabriquer des afficheurs TFT (Thin-film transistor, transistor à effet de champ formé par le dépôt successif de plusieurs couches minces), des OFET de type N, des résistances, condensateurs et inductances.

Comparé aux autres techniques d'impression, le jet d'encre offre des résultats moins précis, moins uniformes, une moins bonne résolution et une vitesse d'impression plus faible. La viscosité du matériau est également cruciale pour ce type d'impression, la buse pouvant s'obstruer ou encore la goutte pouvant trop s'étaler sur le substrat.

Le grand avantage de l'impression jet d'encre réside dans sa simplicité et son coût, plus faible que celui des autres méthodes d'impression.

2. AUTRES ETAPES DE FABRICATION

1.1 PULVERISATION CATHODIQUE

La pulvérisation cathodique est une méthode de dépôt de couche mince. Un plasma est créé dans la chambre de réactive sous vide, les ions du plasma sont guidés par un signal électrique et vont venir bombarder une cible (la matière à déposer) la faire passer en phase vapeur. Une fois vaporisée, cette dernière vient alors se condenser à la surface de l'objet à recouvrir.

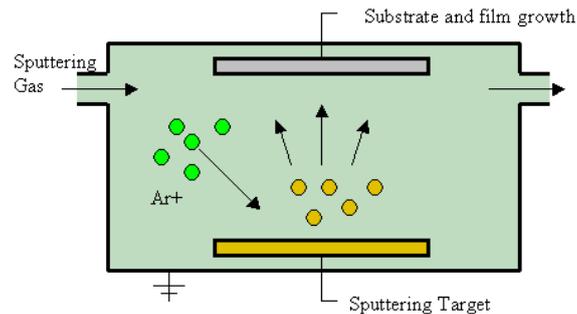


FIGURE 19 - SCHEMA DE LA PULVERISATION CATHODIQUE - SOURCE : WIKIPEDIA

1.2 ABLATION LASER

L'ablation laser est un processus permettant d'enlever de la matière d'une surface en irradiant avec un faisceau laser. Pour de faibles rayonnements laser, le matériau est chauffé et évaporé ou sublimé. Pour un rayonnement plus élevé, le matériau peut être converti en un plasma.

Cette technique peut évidemment être utilisée pour graver des motifs particuliers dans un certain nombre de matériaux.

1.3 ENDUCTION CENTRIFUGE (SPIN COATING)

L'enduction centrifuge est une technique de déposition de couche mince et uniforme sur la surface d'un substrat posé et maintenu par du vide sur un plateau tournant à haute vitesse, afin d'étaler le matériau déposé de façon uniforme par l'action de la force centrifuge.

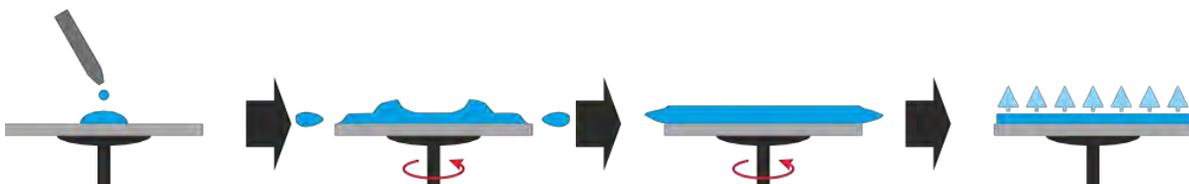


FIGURE 20 - SCHEMA DE PRINCIPE DU SPIN COATING - SOURCE : WIKIPEDIA

IV. LES LIMITATIONS DES SUPPORTS SOUPLES

Nous avons pu voir les nombreux avantages de l'électronique sur support souple, flexibilité, fabrication possiblement moins chère et plus facile, mais ils comportent aussi de nombreux désavantages qui font que la microélectronique conventionnelle à encore de beaux jours devant elle.

Les performances de l'électronique souple sont souvent moins bonnes que celle de l'électronique conventionnelle, nous avons pu voir que c'est en grande partie dû aux matériaux choisis qui offrent soit une moins bonne conductivité soit une moins bonne mobilité de porteurs de charge.

Pour une raison similaire, l'absence de bonnes performances pour les OFET de type N limite fortement les applications, les circuits modernes ayant besoin à la fois de transistors N et P.

En plus des matériaux utilisés qui peuvent être considérés comme fragiles, la durée de vie de certains systèmes électroniques sur support souple comme les dispositifs d'affichage organique est plus courte que celui des LCD traditionnels. Cela est dû au blanchiment (bleachin) des molécules organiques qui émettent la lumière.

CONCLUSION

L'électronique imprimée sur support souple a reçu un grand intérêt en raison de la promesse qu'elle offrirait de bas coûts de fabrication. La plupart des solutions développées utilisent des matériaux organiques, ce qui résulte en des dispositifs avec des performances modestes, parfait pour les applications peu demandeuses que la tendance actuelle veut placer dans tous nos objets du quotidien comme les tags RFID ou encore les objets connectés (Internet of Things).

Les récents progrès concernant les différentes méthodes d'impression et de fabrication ainsi que ceux dans le domaine des matériaux vont finir par converger vers des technologies applicables à l'industrialisation de masse.

Mais il reste encore énormément à faire avant d'arriver à un niveau de fiabilité proche de celui de la microélectronique conventionnelle. Tous les mois des hypothèses sur des nouveaux matériaux potentiels sont posés puis vérifiés, nous pouvons encore dire que nous sommes à l'âge d'or de l'électronique sur support souple. Le bon rapport coût-efficacité des technologies d'impression et leurs emplois pour l'électronique flexible permettra l'apparition de nouvelles applications, et cela risque de changer radicalement le paysage de l'industrie de la microélectronique dans le futur.

REFERENCES

1. T. Mohammed-Brahim, *L'électronique sur substrat souple*, 2014, Enova Lyon.
2. D. Siegel et S. Shivakumar, *The Flexible Electronics Opportunity*, 2014, The national academies press.
3. M. Guérin, *Conception de circuits électroniques au moyen de la technologie CMOS organique imprimée*, 2013, IM2NP, Aix-Marseille Université.
4. *Flexible electronics*, Wikipédia.
5. J. Rangapanaiken, *Demain, l'électronique flexible ?*, 2015, CNRS Le journal.
6. M. D. Dankoco, *Conception et réalisation de Capteurs (Température et pouls) imprimés sur support souple*, 2016, IM2NP, Aix-Marseille Université.
7. C. Maxfield, *Bebop to the Boolean Boogie: An Unconventional Guide to Electronics*, 2008, éditions Newnes.
8. S. Khan et al., *Technologies for Printing Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrate: A Review*, IEEE SENSORS JOURNAL, Vol 15, No.6, Juin 2015.
9. J. C. Perkinson, *Organic Field-Effect Transistors*, MIT, November 19, 2007
10. M. Zaffagni, *Ecrans souples : des électrodes plus flexibles... et moins chères*, Futura-Sciences, 22 janvier 2014.