Isabelle Chartier

L'électronique organique imprimée

Une nouvelle branche de l'électronique

Diplômée de l'Institut d'Optique, Isabelle Chartier est responsable des programmes électroniques organiques imprimés au LITEN – le Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Énergies Nouvelles et les nanomatériaux du CEA[1]*. Elle est également responsable de la plateforme d'impression PICTIC.*

Au cours des dernières décennies, les chimistes ont synthétisé des matériaux organiques – polymères ou constitués de « petites » molécules – permettant le déplacement de charges électriques, créant ainsi des matériaux organiques conducteurs ou semi-conducteurs[2].

Ces matériaux ont été utilisés entre autres pour la réalisation de composants électroniques actifs : transistors, diodes émettrices de lumières (« *Organic Light-Emitting Diode* », OLED[3]), mémoires, capteurs[4]. C'est **l'émergence d'une « électronique organique », une nouvelle branche de l'électronique** qui est venue au cours des dernières années prendre place à côté de l'électronique traditionnelle basée sur des matériaux inorganiques dont le principal est le silicium.

Ces matériaux organiques sont évidemment très différents des métaux ou des semi-conducteurs inorganiques – comme le silicium –, et les composants qu'on en tire ne sont pas identiques. Ils présentent tous deux des avantages et des inconvénients qui les font choisir en fonction des utilisations recherchées.

1. www-liten.cea.fr
2. Un semi-conducteur présente une conductivité électrique intermédiaire entre celle d'un isolant et celle d'un conducteur.
3. Au sujet des OLED, voir les ***Chapitres de I. Cayrefourcq***, ***J.-C. Flores***, ***L. Hirsch*** et ***V. Thulliez*** de l'ouvrage *Chimie et technologies de l'information*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2014.
4. Au sujet des capteurs, voir le ***Chapitres de L. Presmanes***, dans *Chimie et technologies de l'information*, EDP Sciences, 2014.

1 Comparaison entre le silicium et l'électronique organique

Le succès du silicium monocristallin tient à ses propriétés électriques qui permettent la réalisation de semi-conducteurs à fortes mobilités de charges. Cela autorise la mise en œuvre de variations électriques rapides, comme le demandent, par exemple, les applications aux transmissions radiofréquences. Le silicium permet aussi des technologies de fabrication de circuits de dimensions extrêmement petites (motif transistor inférieur à 100 nm), par gravures de couches submicrométriques ou nanométriques et par empilement de nombreuses couches.

L'objectif de la technologie silicium est, depuis plusieurs décennies, la course à la miniaturisation. Celle-ci est décrite par la Loi de Moore[5], qui indique que les dimensions des circuits gravés sont divisées par deux tous les dix-huit mois. La quantité de transistors atteint aujourd'hui le nombre extraordinaire de plusieurs milliers sur une puce de quelques mm² (par exemple pour une puce RFID[6]), et de plusieurs milliards pour les microprocesseurs complexes ou les dispositifs portables. Les dimensions des atomes vont apporter une limite absolue à cette course à la miniaturisation. Dans un autre ordre d'idées, les propriétés macroscopiques du silicium ne sont pas bonnes : c'est un métal fragile et non transparent, ce qui interdit certaines utilisations, en particulier lorsqu'on a besoin de fonction électronique sur une surface de grande dimension. C'est par exemple le cas pour les écrans qui alors utilisent une technologie de silicium amorphe réalisée sur des substrats de verre.

En face de la solution silicium, **la chimie organique offre un nombre de produits pratiquement infini** compte tenu de la richesse des arrangements possibles entre atomes pour former de « petites » molécules ou des polymères ; les produits intéressants sont choisis par ingénierie moléculaire. Les propriétés de transport des produits organiques correspondent à des mobilités de charges électriques beaucoup plus faibles que celles du silicium. Ils ne sont donc pas des substituts de ce dernier pour les applications de l'électronique rapide ou complexe, mais doivent être envisagés pour les très nombreuses applications qui n'exigent pas de grande rapidité électrique ; nous y reviendrons ultérieurement.

En revanche, à la différence des matériaux inorganiques, les matériaux organiques peuvent et doivent être mis en œuvre à basse température, ce qui permet alors de les déposer sur des substrats plastiques qui sont souples, flexibles, aisément formables, robustes et peuvent aussi être transparents.

5. Au sujet de la loi de Moore, voir le ***Chapitre de D. Lévy***, dans *Chimie et technologies de l'information*, EDP Sciences, 2014.

6. Radio-Frequency Identification Devices : dispositifs d'identification par radiofréquence.

2 L'électronique organique apporte une rupture en termes d'applications

2.1. Les procédés de fabrication des circuits en électronique organique imprimée

Les matériaux organiques pour l'électronique peuvent être synthétisés à basse température, et cela ouvre la voie à des procédés inimaginables en électronique silicium, comme les procédés d'impression, qui sont comparativement de très bas coûts, ce qui permet des usages de grande diffusion. Dans certains cas, ces matériaux organiques actifs peuvent être formulés sous forme d'encres et permettre de réaliser les circuits par impression d'une manière tout à fait analogue à ce que l'on fait dans l'imprimerie. On remplace la technologie très sophistiquée des salles blanches et des installations sous vide et à hautes températures nécessaire au silicium par des technologies simples, éprouvées, beaucoup plus classiques et à basse température.

Les motifs élémentaires obtenus par les technologies d'impression ont des dimensions minimales d'environ dix microns et peuvent couvrir des supports de grandes surfaces – des décimètres ou mètres carrés. Les circuits peuvent être déposés sur toute une variété de supports, plats ou non, films plastiques, papier..., qui peuvent être flexibles, transparents, robustes, recyclables, etc. On a toute latitude pour choisir le substrat à utiliser pour empiler les couches qui vont constituer le composant recherché. Les motifs réalisables en électronique organique imprimée ne sont pas aussi petits que ceux de l'électronique silicium. L'imprimerie de Gutenberg descend à cent microns, l'électronique organique à dix microns, mais pas au 0,1 micron de l'électronique silicium. Elle permet en revanche de couvrir de très grandes surfaces telles que des sols ou des toits.

Les technologies d'impression et de mise en œuvre à basses températures changent profondément la logique de conception et d'utilisation des dispositifs ; **les matériaux organiques ouvrent ainsi la voie à des applications non accessibles à la technologie silicium**.

Un autre facteur qui gouverne le champ d'applications des matériaux organiques est la simplicité de la fabrication par les procédés de l'électronique imprimée : l'investissement pour une usine est de l'ordre de cent fois inférieur à celui d'une usine pour puces silicium. Le démarrage de la fabrication est aussi beaucoup plus rapide : à partir d'un dessin il suffit d'un mois pour disposer du composant électronique imprimé sur substrat plastique.

2.2. Les types d'applications ouvertes à l'électronique imprimée

La possibilité de faire des dispositifs sur grandes surfaces est une des propriétés déterminantes de l'extension de l'électronique organique.

On sait placer des fonctions distribuées pour rendre de grandes surfaces sensibles ou actives, permettant par exemple de faire une cartographie thermique en disposant plusieurs capteurs répartis. Ces surfaces pourront être disposées sur des supports flexibles pour une bonne intégration au produit final, et leurs propriétés garantissent la robustesse du fonctionnement : la logique d'intégration de l'électronique organique est complètement nouvelle. Étant par ailleurs de coûts relativement peu élevés, ces dispositifs ont potentiellement de nombreuses applications (***Figure 1***). Citons le domaine de la santé où les capteurs peuvent être introduits dans des dispositifs commodes pour l'usager (pièces moulées par exemple).

Plus généralement, l'électronique organique imprimée est utilisée pour la réalisation d'écrans OLED des téléphones portables (Smartphones), d'interfaces homme/machine, qui doivent bien sûr être adaptées à la dimension des mains des opérateurs, de matrices de capteurs sur de grandes surfaces. Citons également les dispositifs de mesures à faire sur des sols, des lits d'hôpitaux, etc. Les grands marchés de l'électronique imprimée sont les écrans flexibles et les écrans OLED pour l'éclairage (une grande surface émettrice de lumière est plus intéressante qu'une surface équipée de nombreuses petites sources) comme, évidemment, pour l'électronique photovoltaïque[7] qui peut faire usage d'équipements en plastique montés sur les toits (avantage de la souplesse, de la légèreté et de la robustesse).

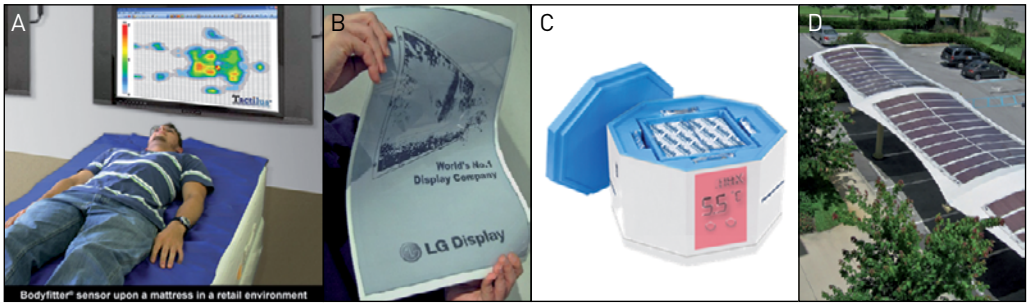
3 Des systèmes hybrides – électronique organique/ électronique silicium

Si les signaux de base peuvent être recueillis par des dispositifs organiques, leur traitement réclame, pour remplir des fonctions complexes (microprocesseurs, traitement du signal, communication), davantage de rapidité que les dispositifs organiques ne

7. Au sujet des panneaux photovoltaïques organiques, voir le ***Chapitre de D. Lincot*** de l'ouvrage *La chimie et l'habitat*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2011.

Figure 1

Dispositifs réalisables par l'électronique organique : A) surface de mesure étendue ; B) écran flexible ; C) emballage intelligent ; D) panneaux photovoltaïques.



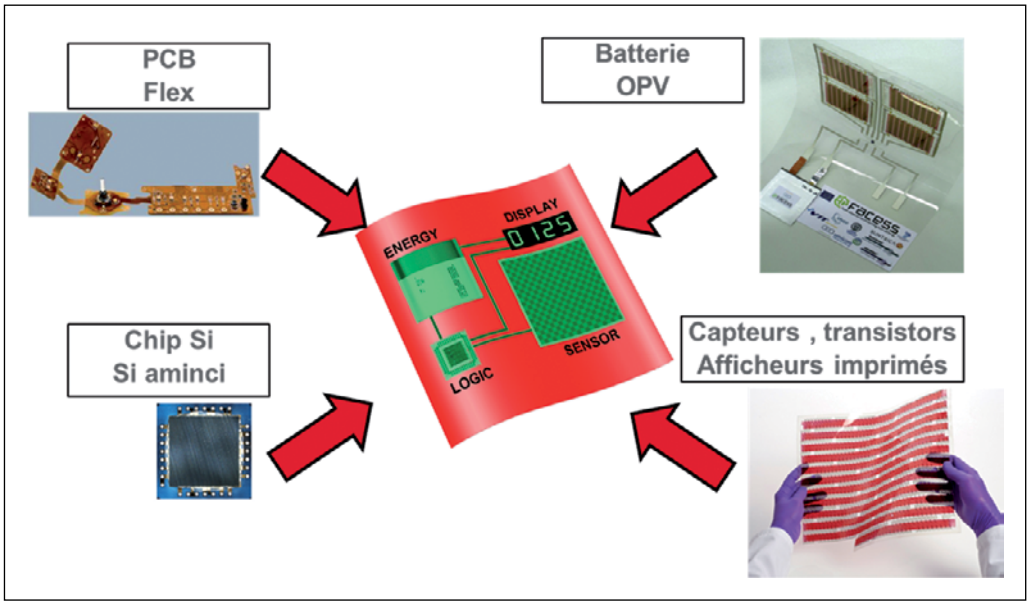


Figure 2

Intégration hybride des technologies. Un même dispositif peut comporter des éléments en électronique organique (batterie photovoltaïque (OPV), détecteur organique (PCB flex) et chip silicium de traitement de signal. Dans l'exemple donné, le dispositif est monté sur support souple).

peuvent en fournir. On développe alors des systèmes hybrides, mariant l'électronique organique (pour bénéficier de grandes surfaces et de bas coûts) avec la technologie silicium. C'est là un des axes de développement actuellement importants : l'hybridation des technologies « sur flex ». Il s'agit d'intégrer cette « nouvelle » électronique avec la « vieille », insérant les composants silicium directement sur éléments plastiques (***Figure 2***).

La ***Figure 3*** donne un exemple de réalisation hybride : écran « électrophorétique » qui offre les mêmes fonctions qu'un écran de « kindle 7 », mais sur support plastique donc beaucoup plus robuste et pratique à l'utilisation. L'écran et son électronique de visualisation sont organiques, mais les fonctions qui nécessitent de la rapidité, comme la communication Wi-Fi pour télécharger les dossiers sur la tablette, sont en électronique silicium.

Il ne s'agit là que d'exemples : les domaines d'applications concernés sont innombrables : systèmes d'éclairage (OLED), écrans souples, photovoltaïque organique, robotique, etc.

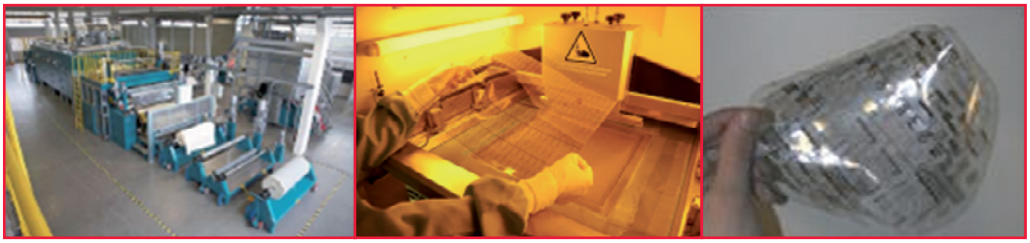
4 Innovation matériaux et procédés technologiques

4.1. Les choix technologiques

Les technologies de production des dispositifs de l'électronique organique, comme indiqué plus haut, empruntent à celles de l'imprimerie (***Figure 4***). On retrouvera, transposées, la technique « roll to roll » utilisée pour l'impression des journaux, le « feuille à feuille » qui sert à

Figure 3

Écran de liseuse sur support souple réalisé par intégration hybrides des technologies.



A B C

Figure 4

Les techniques de l'impression ont été transposées pour l'électronique organique : A) installation d'impression roll to roll (motifs minimum de 100 µm) ; B) équipements « feuille à feuille » adaptés à la fabrication d'écrans LCD (« liquid crystal display » ; motifs minimum de 10-50 µm) ; C) système sur wafer adaptés à des motifs à forte densité (1 µ).

faire les magazines, et une technique « wafer[8] » (dépôt d'une couche sensible sur un support, suivi d'une gravure par photolithographie) pour les travaux de précision.

Les technologies « feuille à feuille » sont très répandues ; elles ont les mêmes standards que les équipements LCD (substrat, batch), des dimensions élémentaires minimum de 10-50 µm.

Dans les cas où la performance en résolution prime sur le coût, on peut faire appel à des procédés sous vide au lieu des procédés liquides de l'imprimerie. Les choix dépendent du type d'application, des contraintes de volume de production, du coût, des performances visées.

4.2. La réalisation des composants

Si les couches actives sont réalisées de façons différentes en électronique organique et en électronique silicium, la nature et le principe de réalisation des composants (transistors, diodes, émettrices, absorbantes, etc.) sont identiques : ils se font par empilement de couches successives (***Figure 5***). Les matériaux employés pour l'électronique organique sont extrêmement variés, mettant à contribution tous les domaines de la chimie (voir l'***Encart : « Les matériaux à la base de l'électronique organique »***). À chaque objectif, il faut définir les procédés et les flux de matière associés.

4.3. L'imprimerie pour l'électronique

Les technologies utilisées pour l'imprimerie pour l'électronique sont à la convergence des industries graphiques et des besoins de l'électronique.

Le principe de la manipulation des encres est le même, mais au lieu d'avoir quatre couleurs (rouge, vert, bleu, noir), on a en électronique quatre encres fonctionnelles (conductrice, semi-conductrice, isolante, électroactive). La composition chimique précise des encres doit concilier plusieurs contraintes (viscosité, résistance au vieillissement, séchage, facilité de manipulation) ; elle résulte d'un travail de formulation spécialisé.

Les motifs fabriqués par impression sont d'environ

8. Un « wafer » est une galette de silicium très pur utilisée pour la fabrication de circuits intégrés ; c'est cette galette qui supportera les millions de transistors qui composent le dispositif.

LES MATÉRIAUX À LA BASE DE L'ÉLECTRONIQUE ORGANIQUE

Les conducteurs

Ils peuvent être des polymères (polyanalynine, polypyrroles, etc.) ; des métaux en suspension (argent, nanoparticules, nanofils, cuivre, carbone) ou des solides inorganiques comme des métaux, dispersés sur feuilles de plastiques.

Les semi-conducteurs

Ils peuvent être des polymères, de petites molécules organiques ou des composés inorganiques (oxydes, silicium).

***Les matériaux électroactifs* (capteurs, conducteurs ioniques pour batteries)**

Ce sont souvent des cristaux ferroélectriques ou piezoélectriques.

Les isolants

Ce sont en général des polymères fluorés ou du PMMA (polyméthylmétacrylate).

***Les supports* (substrats)**

Ils sont particulièrement variés – verre, plastique, papiers, films métalliques...

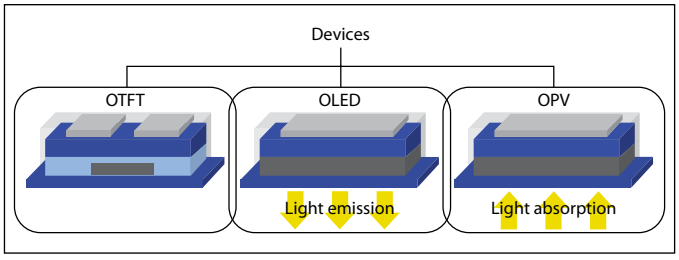


Figure 5

Comme en électronique silicium, les composants en électronique organique se font par empilements de couches successives. (OTFT = transistor organique sur film mince ; OLED = diode organique émettrice de lumière ; OPV = élément photovoltaïque organique).

20-50 microns au lieu de 100 pour le graphique, les couches sont d'épaisseurs contrôlées entre 100 nm et 10 µm. Par ailleurs, afin d'assurer une bonne conduction électrique entre les couches, il est nécessaire d'adapter, par des traitements de surface adéquats, chaque interface.

Les principaux modes de fabrication utilisés sont :

– la **sérigraphie**, technique simple et bon marché dont le principe est résumé sur la ***Figure 6*** ;

– la **flexogravure**, faisant intervenir un rouleau « tampon » comportant la forme à

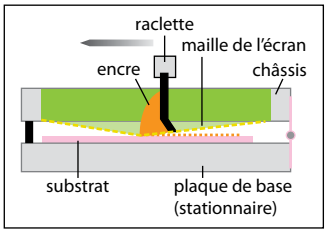


Figure 6

Principe de la sérigraphie. Le motif est tracé sur un textile qui fait pochoir. L'encre est poussée à travers le textile au moyen d'une racle. Ce procédé permet un coût peu élevé pour des motifs d'au moins 70 µm de dimension.

imprimer, permet une résolution meilleure que la sérigraphie pour des motifs plus complexes ;

– L'**héliogravure**, qui en est une variante, permet de déposer l'encre sur des motifs en creux. Cette technique permet de bonnes résolutions, jusqu'à 10 µm ;

– il faut aussi citer la technique de **l'impression digitale sans contact**, qui est celle des imprimantes **à jets d'encre** de la bureautique. Elle présente l'avantage de ne pas nécessiter la préparation de forme (puisque l'information est digitale), de pouvoir s'appliquer sur des substrats non plans et de réaliser des dépôts qui n'endommagent pas la couche précédente. Cette technique demande **une formulation des encres** qui tienne compte de l'utilisation de buses[9]. Ainsi le développement de composants électroniques imprimés nécessite des équipes plurdisciplinaires alliant les équipementiers, les chimistes (formulateurs), les spécialistes des procédés d'impression et des électroniciens qui conçoivent et caractérisent les circuits et les composants.

Le choix du procédé d'impression à utiliser dépend des caractéristiques du composant à réaliser – type de composant donc d'empilement des couches –, de la sélection des encres, qui dépend elle-même des performances demandées et des contraintes en matière de rendement et de reproductibilité du résultat.

9. La buse est une aiguille très fine située dans la tête d'impression et qui projette l'encre sur le papier.

5 Du composant aux systèmes : exemples de démonstrateurs produits

Récemment définis par les laboratoires, très prometteurs en ce qui concerne les applications, très diversifiés aussi, les principes, les technologies et les possibilités d'applications de l'électronique organique constituent un domaine de recherche en plein foisonnement. Non seulement les laboratoires proposent de nouvelles idées de composants et de systèmes, mais de nouvelles entreprises (start-up) se créent pour définir et mettre au point des procédés de fabrication à grande échelle et en grands volumes, proposer de nouveaux dispositifs.

De vastes mouvements de collaboration sont à l'œuvre entre laboratoires de spécialités différentes et entre laboratoires et industriels ; c'est le cas en région grenobloise où sont réunis autour du Laboratoire d'innovations technologiques pour les énergies nouvelles (LITEN) des partenaires universitaires, des industriels de la chimie comme Arkema et des petites entreprises comme ISORG. Les ***Figures 7, 8, 9*** et ***10*** donnent quelques exemples de dispositifs issus de telles collaborations et aujourd'hui en phase de démonstration.

La ***Figure 10*** représente un prototype d'interface utilisateur sans contact (écrans « touchscreen touchless »), une technologie révolutionnaire.

Cette énumération n'est bien entendu pas exhaustive. Ainsi, le photovoltaïque déjà cité est particulièrement prometteur.

A B

Figure 7

Exemples d'applications en développement industriel : A) dispositifs pour imagerie médicale transportables ; B) photodiodes organiques sur plastique pour imagerie.

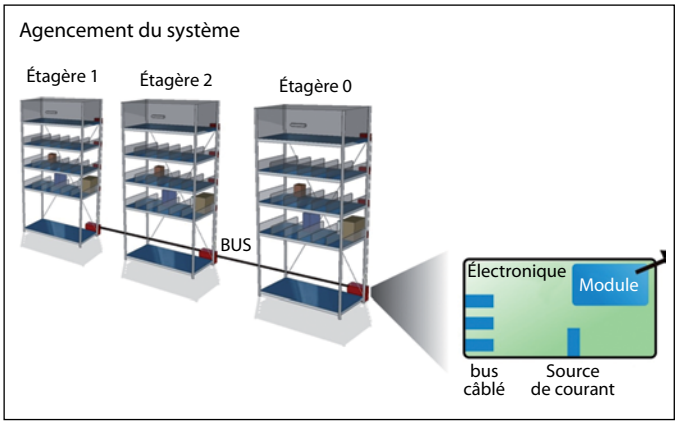


Figure 8

Équipement d'étagères pour gestion logistique automatisée.

Figure 9

Pilulier intelligent. L'électronique organique fait la détection de la rupture de piste (signalant une case vide : absence de pilule), et le silicium traite l'information correspondante (par exemple : commande automatique de recharge).

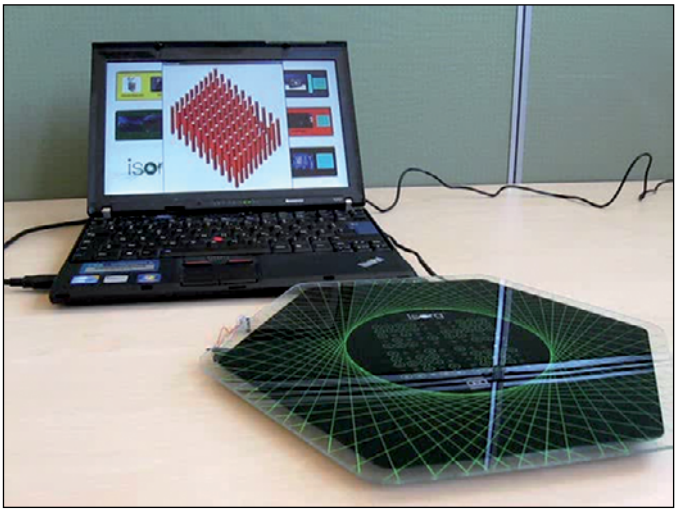


Figure 10

Prototype d'interface utilisateur sans contact réalisé en système hybride par la société ISORG.

Les panneaux peuvent être en plastique (on privilégie la robustesse) ou en verre (on veut conserver la transparence). L'entreprise Disa Solar, qui travaille en collaboration avec le CEA-LITEN, ou l'entreprise Heliatek, par exemple, ont des produits OPV (« *Organic Photovolatic* ») phares en démonstration.

L'essor industriel de l'électronique organique se prépare par toutes ces activités. Il est remarquable qu'elles soient conduites dans le cadre de larges collaborations inter-organismes, comme l'illustre la création de la plateforme PICTIC où les laboratoires mettent à disposition d'industriels appareillages et compétences de pointe (***voir l'Encart : « La plateforme PICTIC***). Ces collaborations s'étendent d'ailleurs au-delà des frontières, et un réseau européen COLAE (« *Commercialising organic and Large Area Electronics* ») est là pour le montrer. Pour réussir l'entrée dans la grande consommation, de nouvelles alliances industrielles doivent être montées : papetiers, imprimeurs, plasturgistes doivent apprendre à se mobiliser ensemble sur ces perspectives.

Au niveau français, la filière est maintenant bien structurée avec l'Association Française d'Électronique Imprimée pour les industriels (AFELIM) et le GDR « Organique Électronique » pour le monde académique.

LA PLATEFORME PICTIC*

Un laboratoire rassemblant les équipements et les compétences nécessaires à leur bonne utilisation a été créé à Grenoble par le CEA-LITEN. Principalement destiné aux utilisateurs extérieurs, en particulier industriels, il porte le nom de plateforme **PICTIC (Plateforme d'Impression de Composants électroniques pour les Technologies de l'Information de la Communication).**

Sa raison d'être est :

– d'**accélérer à l'industrialisation** des technologies électroniques imprimées issues des laboratoires français ;

– de **stabiliser les procédés d'impression** et de les transférer sur des lignes pilotes industrielles ;

– de mettre à disposition des industriels un **outil de prototypage en petites séries** pour tester leurs applications sur le marché.

Elle est équipée :

– de 650 m² de salle blanche dédiée à l'impression ;

– d'un parc équipement d'impression pour feuilles de grandes dimensions (320 mm x 380 mm) adaptable à plusieurs types de procédés et de produits.

*Site : /www-liten.cea.fr/fr/plateformes_technologiques/pictic.htm

Une filière émergente promise à un avenir important

L'électronique imprimée, filière en émergence, est promise à un avenir industriel important. Son développement constitue un objectif exigeant pour toute la branche industrielle. Des matériaux et des procédés nouveaux doivent être préparés, de nouvelles applications qui seront certainement au rendez-vous, compte tenu des attraits très nouveaux offerts par ces technologies, doivent être identifiées : les domaines de la santé, de la logistique, de l'habitat, du transport, l'énergie, le sport, les loisirs, sont des pistes possibles.

La chimie, dans tous les efforts appelés par cette nouvelle filière, est sollicitée au premier plan (***Encart : « La chimie conditionne le progrès de l'électronique organique »***). La durée de vie des composants fabriqués est un facteur essentiel de leur succès : elle nécessite les études de leur vieillissement qui demande une modélisation performante des phénomènes de transport de charge dans le matériau. Et les procédés actuels bénéficieront directement de la mise au point de nouveaux matériaux, de nouvelles encres, de nouvelles formulations.

Ces efforts sont entrepris dans tous les pays développés autour de la planète. C'est une remarque – optimiste – à faire : les laboratoires européens, et en particulier français, sont engagés dans ces voies nouvelles avec de nombreux atouts.

LA CHIMIE CONDITIONNE LE PROGRÈS DE L'ÉLECTRONIQUE ORGANIQUE

L'histoire de l'électronique organique est loin d'être finie !

Les chimistes continuent à travailler sur la compréhension et sur la modélisation des phénomènes : comprendre le vieillissement et l'évolution des matériaux, stabiliser les matériaux, trouver de nouvelles formulations qui rendent le procédé plus robuste.

Le procédé final ne sera pas bon si les chimistes ne continuent pas à accompagner le domaine : il faut des solvants plus « eco-friendly », tester de nouveaux matériaux pour de nouveaux objectifs (par exemple remplacer l'oxyde l'indium par un conducteur transparent réellement flexible, tester le graphène, les nanofils d'argent, etc.