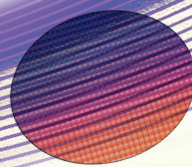
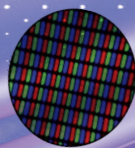
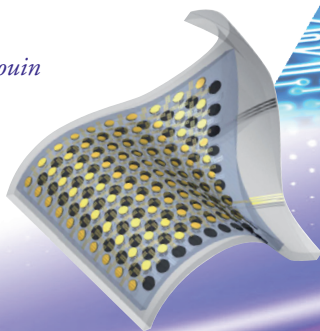




Chimie et technologies de l'information

Ian Cayrefourcq
Isabelle Chartier
Bertrand Demotes-Mainard
Sébastien Février
Jean-Charles Flores
Lionel Hirsch
Anatole Lécuyer
Yannick Le Tiec
Didier Lévy
Lionel Presmanes
Patrice Simon
Vincent Thulliez
Michel Valache

Coordonné par
Minh-Thu Dinh-Audouin
Danièle Olivier
Paul Rigny



Chimie et technologies de l'information



Cet ouvrage est issu du colloque « Chimie et technologies de l'information »,
qui s'est déroulé le 6 novembre 2013 à la Maison de la Chimie.

« **COLLECTION CHIMIE ET ...** »

Collection dirigée par Bernard Bigot

Président de la Fondation internationale de La Maison de la Chimie

Chimie et technologies de l'information

Ian Cayrefourcq, Isabelle Chartier, Bertrand Demotes-Mainard,
Sébastien Février, Jean-Charles Flores, Lionel Hirsch, Anatole Lécuyer,
Yannick Le Tiec, Didier Lévy, Lionel Presmanes, Patrice Simon,
Vincent Thulliez, Michel Valache

Coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin,
Danièle Olivier et Paul Rigny



Conception de la maquette intérieure et de la couverture :
Pascal Ferrari et Minh-Thu Dinh-Audouin

Images de la couverture, en page 1 : Cellules solaires, vue au microscope d'une anode, zoom sur un écran avec pixel (BASF), micro-batterie 3D étirable (S. Xu *et al.*, 2013, Stretchable batteries with self-similar serpentine interconnects and integrated wireless recharging systems, *Nature Communication*, vol. 4).

Iconographie : Minh-Thu Dinh-Audouin
Mise en pages et couverture : Patrick Leleux PAO (Caen)

Imprimé en France

ISBN : 978-2-7598-1184-7

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2014

EDP Sciences
17, avenue du Hoggar, P.A. de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Ont contribué à la rédaction de cet ouvrage :

Ian Cayrefourcq

Directeur des technologies émergentes du groupe Arkema

Isabelle Chartier

Responsable des programmes électroniques organiques imprimés

Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Énergies Nouvelles et les nanomatériaux (LITEN), CEA

Responsable des relations industrielles de la plateforme d'impression PICTIC

Bertrand Demotes-Mainard

Vice-président Recherche et Technologie Matériels de la Direction technique du groupe Thales

Sébastien Février

*Chercheur
Institut XLIM de l'Université de Limoges, UMR CNRS 7252*

Jean-Charles Flores

Chercheur, spécialiste Électronique organique BASF

Lionel Hirsch

*Directeur de recherche au CNRS
Laboratoire de l'Intégration des Matériaux au Systèmes (IMS) à l'Université de Bordeaux.*

Anatole Lécuyer

Directeur de recherche, Responsable de l'équipe Hybrid de l'Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA)

Yannick Le Tiec

*Université Grenoble Alpes
CEA, LETI, MINATEC Campus (Grenoble)
LETI (Laboratoire d'Électronique et des Technologies de l'Information)*

Didier Lévy

*Advanced R&D Program Manager
STMicroelectronics*

Lionel Presmanes

*Chargé de recherche au CNRS
Centre Inter-universitaire de Recherche et d'Ingénierie des MATériaux (Institut Carnot CIRIMAT)
UMR CNRS 5085 (Université Paul Sabatier de Toulouse)*

Patrice Simon

*Professeur à l'Université Paul Sabatier
Laboratoire Centre Inter-universitaire de Recherche et d'Ingénierie des MATériaux (CIRIMAT).
Directeur Adjoint du Réseau sur le Stockage Electrochimique de l'Énergie, FR CNRS n° 3459*

Vincent Thulliez

Responsable du groupe Nanomatériaux fonctionnels Solvay - Recherche avancée et innovation technologique

Michel Valache

*Directeur Général Adjoint de Veolia Propreté France
Président de la Fédération Nationale des Activités de la Dépollution et de l'Environnement
Président de l'Association Alliance Chimie Recyclage (2ACR)*

Équipe éditoriale :

**Minh-Thu Dinh-Audouin,
Danièle Olivier
et Paul Rigny**

Vj k'ŕ ci g'k'pvgpvk'p'cm' 'i'gh'ð'nc'pm

Sommaire

Avant-propos : par **Danièle Olivier** et **Paul Rigny** 9

Préface : par **Bernard Bigot**..... 13

Partie 1 Le futur et la gestion du futur

Chapitre 1 : Commander « par la pensée »
avec les interfaces cerveau-ordinateur ?
d'après la conférence d'**Anatole Lécuyer** 17

Chapitre 2 : La faible longévité des supports
d'information numérique : un défi technologique
d'après la conférence de **Franck Laloë** 35

Chapitre 3 : Faire du déchet une ressource,
un enjeu pour l'industrialisation des filières
et des territoires en France
par **Michel Valache** 41

Partie 2 Smartphones et tablettes : un condensé de chimie Le point de vue des industriels

Chapitre 4 : Les matériaux avancés, moteurs
de l'innovation en électronique
d'après la conférence de **Vincent Thulliez**... 53

Chapitre 5 : Les multiples contributions
de la chimie dans la conception des tablettes
et des Smartphones
par **Jean-Charles Flores** 67

Chapitre 6 : Les polymères se réveillent
pour l'électronique !
d'après la conférence de **Ian Cayrefourcq** ... 77

Chapitre 7 : De la chimie au radar du Rafale
d'après la conférence de **Bertrand Demotes-
Mainard** 93

Chapitre 8 : Les nouveaux matériaux, moteurs de l'amélioration de la performance en microélectronique silicium d'après la conférence de Didier Lévy	103
--	-----

Partie 3 Électronique et composants

Chapitre 9 : L'électronique organique imprimée. Une nouvelle branche de l'électronique par Isabelle Chartier	121
--	-----

Chapitre 10 : La chimie au cœur des (nano)transistors par Yannick Le Tiec	133
---	-----

Chapitre 11 : Microsystèmes pour le stockage électrochimique de l'énergie par Patrice Simon	155
---	-----

Partie 4 Optique et capteurs

Chapitre 12 : Les diodes électroluminescentes organiques : des sources « plates » de lumière d'après la conférence de Lionel Hirsch	183
---	-----

Chapitre 13 : La fibre optique : Internet dans un grain de sable d'après la conférence de Sébastien Février	199
---	-----

Chapitre 14 : Micro-capteurs à semi- conducteurs pour la détection du CO ₂ par Lionel Presmanes	217
--	-----

Avant-propos

Un ouvrage pour comprendre le futur en marche !

Le rôle – souvent même majeur – de la chimie n'apparaît guère à première vue aux yeux de ses utilisateurs. C'est l'une des raisons d'être essentielles de cette collection *Chimie et...*, comme on le voit dans les titres de la collection tels que *La chimie et le sport*, *Chimie et transports*, etc., car le sportif ou l'utilisateur des transports sont bien loin de réaliser tout ce qu'ils doivent à la chimie en profitant des progrès de la technique qu'ils pratiquent.

Chimie et technologies de l'information, ce nouveau membre de la collection *Chimie et...* est emblématique sous ce rapport. Emblématique parce que le citoyen du XXI^e siècle est en quelque sorte pris par le tourbillon des nouveaux appareils : ils lui apportent de nouvelles possibilités qui tout d'abord l'étonnent et l'émerveillent, puis qu'il assimile au point de les « trouver normales ». Il en modifie sa façon de vivre et de communiquer avec son entourage puis attend comme « normaux » les perfectionnements... comme si une nouvelle loi naturelle, une « loi du

progrès éternel », lui devait une nouvelle génération d'appareils chaque printemps. Ce processus est si rapide que l'utilisateur ne se pose pas un instant la question technique correspondante : comment ces progrès sont-ils possibles ? Qu'on songe pour illustrer la vitesse de ces évolutions aux engins volumineux et lourds, au regard des critères d'aujourd'hui, qu'étaient les premiers téléphones portables, et aux attentes qui se sont manifestées vis-à-vis de « la nouvelle génération », puis de la « 4G », etc., des premières versions de la Wi-Fi puis de sa banalisation...

Derrière la naissance de ces appareils puis de ces évolutions, se trouve un mot clé : la miniaturisation. Comment dans les années 1970 on pouvait mettre 10 000 transistors sur une plaquette de silicium d'1 cm², et comment aujourd'hui on sait en mettre un milliard. C'est véritablement époustouflant si l'on veut bien y songer (ce qui n'est d'ailleurs pas si facile tant l'énormité de ce nombre, un milliard, dépasse l'imagination). Cela vient entre autres de la technique de la lithographie pour laquelle on a su développer des polymères

photosensibles, des sources de lumière suffisamment fines, des conditions de marquage appropriées... invention de matériaux polymères, de procédés photochimiques. Et comment les substrats minéraux, du silicium d'abord, d'autres composés minéraux mixtes aujourd'hui, ont pu être conçus et fabriqués avec des degrés de pureté qui dépassent, eux aussi, l'imagination (voir les chapitres de J.-C. Flores, I. Cayrefourcq, V. Thulliez, D.Lévy et de B. Demotes-Mainard) !

Un autre mot clé s'impose : le stockage de l'énergie. Car l'usager moyen ne va peut-être pas y penser : mais tous ces appareils, ces capteurs ou ces voyants, s'ils sont capables de fonctionner pour ainsi dire « tout seuls », n'est-ce pas là aussi miraculeux ? Tout appareil réclame de l'énergie. D'origine humaine ou animale naguère, elle ne pouvait permettre qu'une mobilité limitée aux appareillages. Le pétrole puis l'électricité, depuis le début du XX^e siècle, ont bien changé la situation en donnant naissance au transport automobile. Mais on voit que les téléphones se sont affranchis d'être reliés aux fils électriques, et verrait-on les usagers emporter une réserve d'essence comme si un téléphone pouvait marcher avec un briquet ? Les progrès réalisés dans le silence des laboratoires pour l'invention, le développement et la mise au point de piles avec toujours plus d'heures d'autonomie et de puissance réservée, et qui ont permis l'essor des nouvelles technologies, sont absolument fascinants

(comme l'aborde le chapitre de P. Simon).

Pour dominants qu'ils soient dans la vie quotidienne du citoyen du XX^e siècle, il ne faut pas limiter les applications des nouvelles technologies aux tablettes et Smartphones. Des techniques que l'on croyait classiques adoptent de nouvelles versions : de nouveaux capteurs pour contrôler l'environnement, de plus en plus pour servir de contrôle médical rapproché, de nouveaux dispositifs d'éclairage par OLED, des positionnements de capteurs à l'extrémité de fibres optiques (voir les chapitres de L. Presmanes, L. Hirsch et S. Février).

Cette révolution technique enclenchée voilà quelques décennies, et dont on voit déjà qu'elle révolutionne nos vies, n'est pas finie. La génération actuelle des dispositifs repose à la base sur les substrats silicium ou sur des composés minéraux nouveaux découverts par les laboratoires de chimie du solide. Mais voici que le domaine de la chimie organique se met à être exploré par les laboratoires, avec sa quasi-infinité de composés réalisés ou réalisables. Cela ouvre des perspectives d'autant plus brillantes que la science chimique sait de mieux en mieux préciser le produit qu'il va lui falloir pour obtenir telle ou telle propriété fonctionnelle recherchée pour le but poursuivi. Ainsi déjà, grâce à la chimie organique, s'annoncent au niveau du laboratoire de nouveaux usages qu'on croyait réservés à la science fiction : écrans souples, pliants, enroulables,

surfaces permettant la fabrication de circuits électroniques par impression, panneaux muraux activés, panneaux solaires souples, etc. (chapitre d'I. Chartier).

Le présent ouvrage fera mieux comprendre aux lecteurs l'arrière-plan technique qui a permis la naissance et l'essor, puis pour les années qui viennent, le développement des appareils de communication, dont on réalise à quel point ils conditionnent nos existences. Il n'élude pas quelques questions plus terre à terre, mais qu'on aurait bien sûr grand tort de négliger : comment recycler les déchets de cette industrie de technologie nouvelle en atténuant aussi le risque de manquer de ressources minérales néces-

saires ; comment s'y prendre pour conserver les informations archivées sur support informatique – une question qui n'a pas encore trouvé de solution aussi performante que les supports papier ! Et les « rêveurs » ou les futuristes pourront réfléchir à la lecture du chapitre introductif (A. Lécuyer) qui montre l'ordinateur gouverner la pensée d'un opérateur.

Danièle Olivier,
*Vice-présidente
 de la Fondation de la Maison
 de la Chimie.*
Paul Rigny,
*Conseiller scientifique
 auprès du président
 de la Fondation
 de la Maison de la Chimie*

Vj k'ŕ ci g'k'pvgpvk'p'cm' 'i'gh'ð'nc'pm

Préface

L'objectif de cette collection, dont cet ouvrage est le dixième exemplaire, est de faire prendre conscience aux lecteurs non spécialistes de l'apport positif de la chimie dans la vie quotidienne de chacun, et cela tout particulièrement en direction de la partie la plus jeune des lecteurs, c'est-à-dire en direction des lycéens et des étudiants. Nous voulons contribuer à préparer l'avenir, à développer leur intérêt pour les sciences et les technologies, à les aider à devenir des citoyens éclairés et responsables. Nous voulons les encourager à s'orienter vers l'industrie et la recherche, et contribuer ainsi au développement d'une industrie chimique innovante, respectueuse de l'environnement, compétitive et porteuse d'emplois.

Cette collection est l'une des pièces maîtresses de cet objectif : les thèmes transdisciplinaires choisis ont toujours une grande importance sociale, économique ou culturelle et correspondent à la volonté de mettre la Science au service des Hommes et de leur qualité de vie. Les auteurs s'efforcent de répondre avec franchise et toute la rigueur scientifique souhaitable, en

parfaite transparence, aux questions et parfois même aux inquiétudes que suscitent les sciences de la chimie. Nous souhaitons aussi montrer aux jeunes étudiants et aux familles l'intérêt et la diversité des domaines d'application et des emplois de tout niveau qu'elles recouvrent.

Comment mieux intéresser les jeunes aux sciences et technologies, notamment à celles de la chimie, qu'en leur permettant, au travers des exemples concrets, de mieux connaître et de mieux comprendre un domaine qui, par l'usage quotidien qu'ils en font, leur est familier et qu'il apprécient tout particulièrement : celui des Smartphones, des tablettes, et plus généralement des technologies de l'information et de la communication ; c'est pourquoi nous l'avons choisi pour thème de ce dixième ouvrage.

En téléphonant, en surfant sur votre tablette ou sur votre Smartphone, en écoutant un CD, en regardant la télévision, vous n'avez sans doute jamais eu l'impression de faire appel aux ressources qu'offre la chimie. Et pourtant, vous découvrirez dans ces chapitres qu'elle est partout présente et que son rôle est prépondérant

dans les fulgurants progrès techniques des objets de communication dont beaucoup n'existaient pas encore il y a dix ans.

Quelques-uns des meilleurs experts scientifiques et industriels du domaine ont accepté de vous en convaincre et de faire le difficile exercice de vous informer sur les progrès les plus récents de manière accessible, tout en demeurant passionnante, pour le large éventail de lecteurs.

Vous serez informés non seulement sur les procédés et les produits existants mais aussi sur ceux qui vont très probablement émerger dans les prochaines années. Avec eux, vous découvrirez la richesse du dialogue transdisciplinaire, et le fait que les plus belles innovations résultent bien souvent, et tout particulièrement dans ce domaine, de la synergie des collaborations possibles entre des chimistes, des physiciens, des biologistes et des mathématiciens.

C'est pourquoi le premier chapitre portera sur un thème qui vous fera fantasmer, mais dont nous voyons déjà les premières applications concrètes, je veux parler des interfaces entre nos cerveaux et les ordinateurs. Mais à cette vision enthousiasmante du futur, il faut pragmatiquement associer deux problèmes importants qui ne sont encore que partiellement résolus : la faible longévité des supports d'information numérique et la gestion des déchets issus de ces supports.

Deux chapitres vous montreront pourquoi le caractère durable des procédés et des

produits doit être maintenant au cœur des préoccupations des scientifiques universitaires et industriels.

Dans les chapitres suivants, cinq experts industriels appartenant aux grands groupes internationaux – trois chimistes et deux utilisateurs de la chimie – vous expliqueront où et comment la chimie sert à fabriquer et à faire fonctionner Smartphones et tablettes d'aujourd'hui et de demain.

La troisième partie sera consacrée aux progrès de la micro-électronique et aux écrans flexibles de grande surface résultant des progrès de l'électronique organique imprimée.

La dernière partie dédiée aux nouveaux écrans, capteurs et fibres optiques, vous donnera non seulement un aperçu des nouveaux produits existants et de ceux qui vont émerger, mais vous permettra de comprendre leur fonctionnement et le rôle qu'y joue la chimie.

Je vous souhaite une excellente lecture.

Bernard Bigot

*Président de la Fondation
Internationale de la Maison
de la Chimie*

*Administrateur Général
du CEA*

Partie 1

Le futur et la gestion du futur

Vj k'ŕ ci g'k'pvgpvk'p'cm' 'i'gh'ð'nc'pm

Commander « par la pensée » avec les interfaces cerveau- ordinateur ?

D'après la conférence d'Anatole Lécuyer

Anatole Lécuyer est directeur de recherche à l'Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (Inria)¹, dont il est responsable de l'équipe Hybrid du centre de recherche de Rennes. Spécialiste de la réalité virtuelle, ses principaux travaux et recherches portent sur l'interaction en trois dimensions avec les environnements virtuels, les interfaces haptiques et les interfaces cerveau-ordinateur, thème de ce chapitre. Il est impliqué dans de nombreux programmes de recherche collaborative. Il est éditeur associé à plusieurs revues dans ce domaine, et membre du comité d'administration de l'Association Française de Réalité Virtuelle.

Pour découvrir le domaine de la réalité virtuelle et ses technologies, entrons dans la salle immersive appelée Immersia, toute dernière génération de réalité virtuelle, du Centre de Recherche de Rennes (**Figure 1A**). L'une des plus grandes au monde, elle mesure dix mètres de large, quatre mètres de haut, et quasiment quatre mètres de

profondeur. On peut y être immergé dans un monde 3D en stéréoscopie² avec un effet holographique saisissant. Tout s'y passe comme si vous aviez un écran de cinéma en 3D en face, mais aussi à droite, à gauche et sous vos pieds, et vous voyez en relief tout autour de vous.

1. www.inria.fr

2. Impression du relief dans des images à deux dimensions.

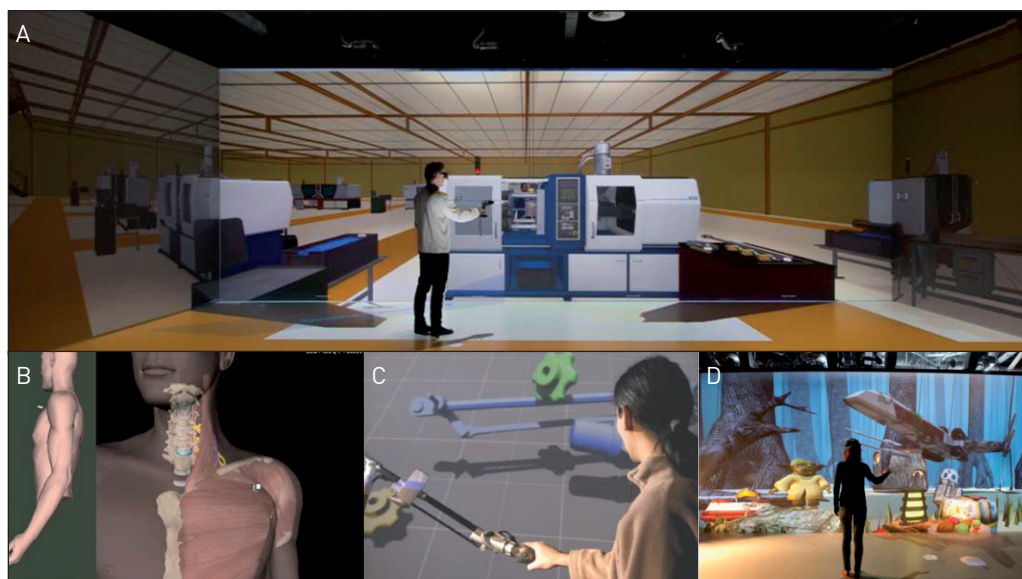


Figure 1

A) La salle immersive Immersia (Inria/IRISA, Rennes) ; B) exemples d'applications de la réalité virtuelle : en médecine, dans la conception industrielle, pour le divertissement...

Il est de plus possible d'interagir avec cet environnement virtuel, avec des interfaces à retour d'effort³, c'est-à-dire à retour tactile, pour sentir ou toucher des objets virtuels, avec du son spatialisé qui accompagne.

Citons quelques applications de la réalité virtuelle et de ses technologies. La **Figure 1B** donne un exemple en médecine, dans le domaine des simulateurs médicaux, qui permettent à des chirurgiens de s'entraîner sur des patients virtuels avant d'aller opérer un patient réel. La **Figure 1C** donne une application industrielle avec la simulation de l'assemblage pour la conception d'automobiles ou de

pièces d'avions. Les technologies de réalité virtuelle permettent de réaliser des maquettes virtuelles en échelle 1 avant de passer sur des maquettes réelles. La **Figure 1D** montre une application dans le domaine du divertissement

On trouve encore bien d'autres domaines d'applications tels que la conception en architecture ou en urbanisme, avec la visite de bâtiments virtuels, ou encore la création artistique, notamment dans les jeux vidéo. Il existe dès à présent de nombreuses manières d'interagir avec ces mondes virtuels.

Le domaine de la réalité virtuelle donne lieu à plusieurs axes de recherche par l'équipe Hybrid de Rennes (**Figure 2**)⁴.

Ce chapitre porte sur les interfaces cerveau-ordinateur (**Figure 2F**), mais mentionnons qu'il existe de nombreuses

3. Les interfaces à retour sensoriel ou retour d'effort permettent de ressentir la position et les mouvements, les forces exercées (collisions, poids, viscosité), à l'aide de capteurs proprioceptifs situés dans les muscles et les tendons.

4. www.inria.fr/equipes/hybride

autres manières d'interagir avec un monde virtuel. On peut par exemple interagir avec ses yeux *via* une interface visuelle (**Figure 2A**), avec ses mains *via* l'interface haptique (qui concerne la sensibilité cutanée, **Figure 2B**), avec son

corps (**Figure 2C**). Ce dernier type d'interface, illustré par le dispositif JOYMAN, où le corps est directement utilisé pour interagir en se penchant vers la droite, la gauche, en avant, en arrière, permet de naviguer facilement et simplement

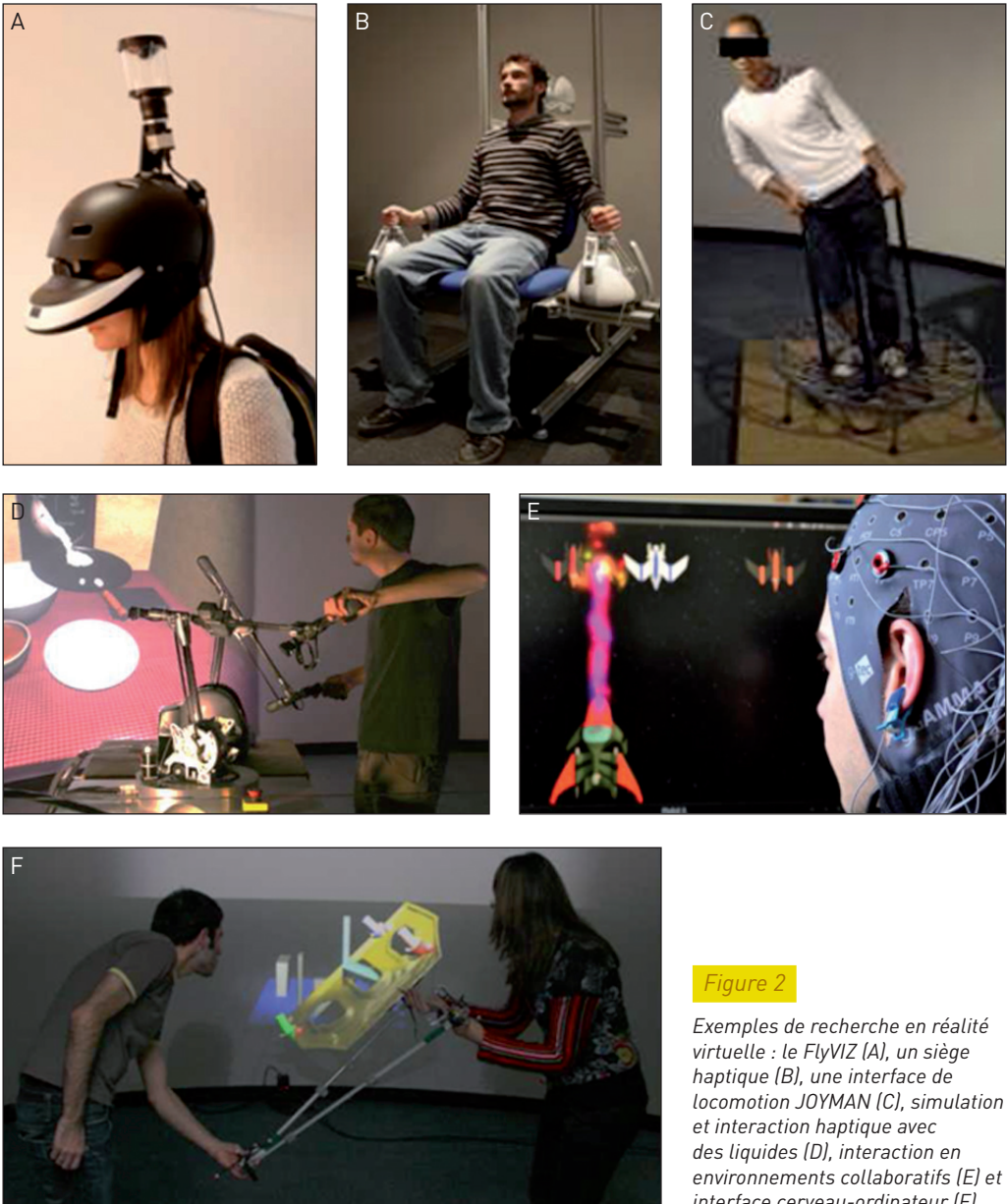


Figure 2

Exemples de recherche en réalité virtuelle : le FlyVIZ (A), un siège haptique (B), une interface de locomotion JOYMAN (C), simulation et interaction haptique avec des liquides (D), interaction en environnements collaboratifs (E) et interface cerveau-ordinateur (F).

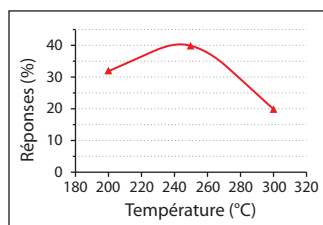


Figure 33

Détection de CO_2 en fonction de la température pour le nano-composite $\text{CuO/CuFe}_2\text{O}_4$. On visualise une température optimale à 250 °C.

Le futur des micro-capteurs : un avenir prometteur lié à la chimie

Le marché des micro-capteurs de gaz est en plein développement, les besoins sont importants. Les micro-capteurs à semi-conducteur industriels, grâce à la multiplication du nombre de puces sensibles dans chaque dispositif, vont devenir très bientôt de véritables nez électroniques miniatures. Cependant, il n'existe pas encore dans l'industrie de puce sensible semi-conductrice pour détecter le CO_2 , mais les recherches dans le domaine des nouveaux matériaux nano-composites donnent dès à présent des résultats intéressants.

D'un point de vue général, les progrès technologiques sont dépendants de la mise au point à l'échelle nanométrique de nouveaux matériaux construits comme des lego briques après briques, chaque brique apportant des propriétés complémentaires des autres.