

**Intitulé du Sujet de Thèse : Des colles adaptables pour une économie circulaire**

**Laboratoire :** Institut de Chimie Radicalaire

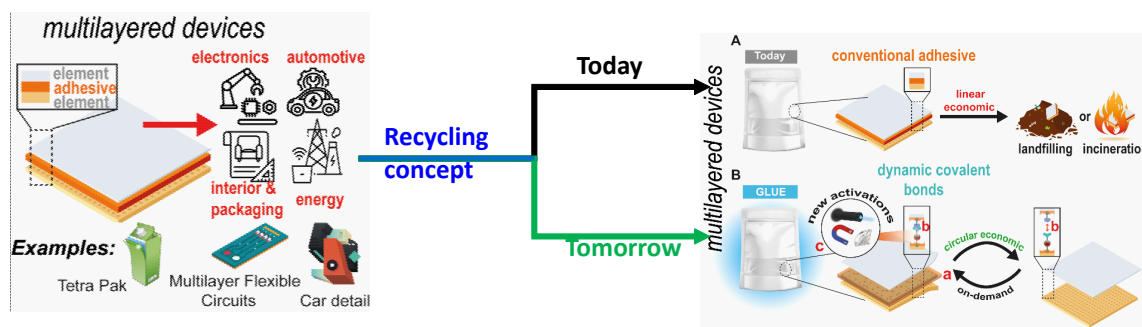
**Equipe :** Chimie Radicalaire Appliquée à la Biologie - CRAB

**Directeur de thèse HDR (100%) :** Sylvain Marque

Co-encadrant non HDR : Jean-Patrick Joly

e-mail : sylvain.marque@univ-amu.fr; jean-patrick.JOLY@univ-amu.fr

**Descriptif du projet :** Aujourd'hui, notre vie quotidienne dépend directement ou indirectement de dispositifs multicouches (matériaux avancés capables de réagir de manière contrôlée aux variations de leur environnement) composés de différents éléments ou couches (Fig. 1). Pour maintenir ces éléments ensemble, on utilise des adhésifs (technologie de collage) pour assembler chaque pièce. Ces dispositifs trouvent de nombreuses applications dans l'électronique, l'automobile, l'aménagement intérieur et les dispositifs énergétiques. Ces éléments sont liés et superposés à l'aide d'adhésifs pour former des matériaux ou dispositifs multicouches. Chaque couche est sélectionnée pour apporter une propriété spécifique au matériau de base, en fonction de l'application. Notre objectif est de développer un système de collage « programmable » où l'adhérence est réversible à la demande. La diversité des exigences de collage est manifeste dans toutes ces applications industrielles. Par exemple, l'emballage Tetra Pak combine papier (couche extérieure), PE (couche intérieure) et feuille d'aluminium (couche barrière), nécessitant des adhésifs thermofusibles PE pour le scellage et des adhésifs de lamination pour garantir l'intégrité de la barrière. Malheureusement, quel que soit l'adhésif utilisé, les stratégies les plus courantes de gestion des déchets d'appareils multicouches restent la mise en décharge et l'incinération, en raison de l'incompatibilité des différentes couches avec les technologies de recyclage traditionnelles, (Fig. 1 droite A).



**Fig. 1** A gauche Diverses applications des dispositifs multicouches (éléments assemblés par adhésif). À droite : concepts de recyclage. A) économie linéaire et B) économie circulaire où (a) – matériaux adhésifs capables de (b) – liaison chimique réversible et (c) – incitations à la réversibilité.

Cette pratique est contraire à la réglementation européenne en vigueur, notamment à la directive relative aux emballages et aux déchets d'emballages et ses mises à jour, qui exigent plus de 30 % de contenu recyclé d'ici 2030 pour les emballages plastiques. À l'heure actuelle, il n'existe aucune technologie commercialement viable pour la déconstruction ou le décollage non destructif des éléments des dispositifs multicouches. Par conséquent, les fabricants de ces dispositifs risquent de voir leur réputation environnementale et leurs avantages économiques s'en trouver affectés si aucune solution n'est trouvée.

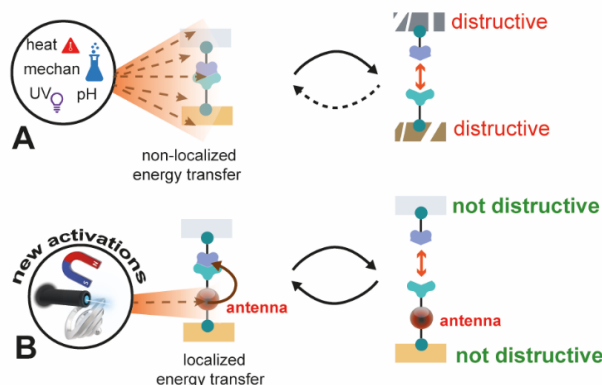
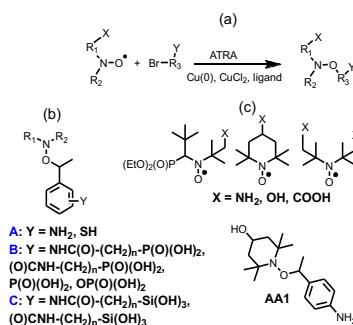
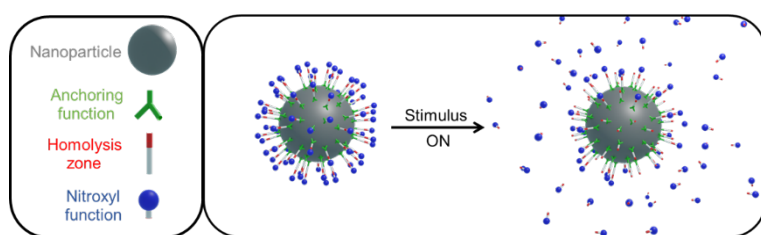


Fig. 2. Comparaison des stimuli couramment utilisés (A) pour le DCB avec de nouvelles activations (B) par la lumière, le champ magnétique alternatif et la radiofréquence à l'aide de nanomatériaux d'antenne, qui transfèrent l'énergie aux éléments du DCB

Pour surmonter ces défis, une avancée conceptuelle majeure est indispensable. Les stimuli conventionnel (figure 2A) conduisent à une altération/destruction du matériau empêchant son recyclage. Cependant, l'utilisation substances capables de capter, de focaliser et de transférer efficacement l'énergie de stimuli externes (Fig. 2B) vers des liaisons activables (DCB) conduit à une dégradation de la colle dans des conditions douces permettant ainsi un recyclage optimal de nombreux matériaux avec des conditions économiquement viable.

Pour atteindre nos objectifs, nous allons développer des objets hybrides alkoxyamines@nanoparticules impliquant une alkoxyamine multifonctionnelles : une fonction pour polymériser et réticuler avec le monomère utiliser pour les priorités d'adhésion (isocyanate ou epoxy), une fonction pour s'accrocher sur la nanoparticule (acide phosphonique ou siloxane) et une liaison C—ON dont la labilité est dépendente de la structure des fragments alkyles et nitroxyles. Quelques exemples sont décrits ci-après.



### Références Bibliographiques

<https://www.feica.eu/our-industry/markets>  
 O Guselnikova et al *Chem. Soc. Rev.* **2023**, 4755  
 Directive 94/62/EC  
 YL Tan et al. *ACS Nano*, 2024, 24682  
 F Abdel Sater et al. *Mater. Chem. Front.* **2025**, 9, 2522 - 2529.  
 B Bouvet et al *Nanoscale* **2023**, 144.