

## Résonance plasmonique de surface pour les technologies CND

### *Surface Plasmon Resonance for NDT Technologies*

Maha HADDED<sup>1\*</sup>, Thiago LUIZ LARA OLIVEIRA<sup>1</sup>, Emilien BOURDON<sup>1</sup>, Alan JEAN-MARIE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> : Capgemini Engineering, Parc Centreda – Bâtiment Synapse, France - 31700 Blagnac  
e-mail : [maha.hadded@capgemini.com](mailto:maha.hadded@capgemini.com)\*, [thiago.luz-lara-oliveira@capgemini.com](mailto:thiago.luz-lara-oliveira@capgemini.com), [emilien.bourdon@capgemini.com](mailto:emilien.bourdon@capgemini.com) et [alan.jean-marie@capgemini.com](mailto:alan.jean-marie@capgemini.com)

#### Résumé

L'étude présente une analyse théorique des propriétés optiques des nanoparticules cœur/coquille Ni/Au en utilisant la théorie de Mie. Cette approche permet d'optimiser des paramètres clés, tels que la taille et l'épaisseur de la coquille, afin de prédire la réponse optique de ces nanoparticules dans différentes conditions.

Cependant, une discussion plus détaillée sur l'impact des résultats obtenus sur les méthodes de détection des défauts dans les composites serait bénéfique. En particulier, il serait intéressant d'examiner comment ces nanoparticules améliorent concrètement la sensibilité et la précision du CND dans des contextes réels de surveillance des dommages et de la rupture des composites. Une comparaison avec d'autres approches existantes permettrait d'évaluer la valeur ajoutée de cette méthodologie et d'identifier ses éventuelles limites.

En intégrant ces éléments, l'étude gagnerait en clarté quant à ses implications pratiques, notamment pour des applications en aéronautique et dans d'autres secteurs nécessitant des méthodes avancées de diagnostic des matériaux.

**Mots Clés :** Nanoparticule, Composite PMC, propriétés optiques, Théorie de Mie, Diffusion, CND

#### Abstract

The study presents a theoretical analysis of the optical properties of Ni/Au core-shell nanoparticles using Mie theory. This approach enables the optimization of key parameters, such as the size and shell thickness, to predict the optical response of these nanoparticles under different conditions.

However, a more detailed discussion on the impact of the obtained results on defect detection methods in composites would be beneficial. It would be interesting to examine how these nanoparticles concretely enhance the sensitivity and accuracy of NDT in real-world contexts of damage monitoring and composite failure analysis. A comparison with other existing approaches would help assess the added value of this methodology and identify its potential limitations.

By incorporating these aspects, the study would gain greater clarity regarding its practical implications, particularly for applications in the aerospace industry and other sectors requiring advanced material diagnostic methods.

**Keywords:** Nanoparticle, Composite PMC, Optical properties, Mie Theory, Scattering, CND

### 1. Introduction

La résonance plasmon de surface (RPS) est un phénomène optique qui se produit lorsque des ondes lumineuses interagissent avec les électrons libres à la surface de matériaux conducteurs, tels que les métaux [1-2]. Cette interaction génère des oscillations collectives des électrons, appelées plasmons de surface, qui sont extrêmement sensibles aux variations des propriétés optiques de leur environnement immédiat [3-4]. La RPS se manifeste généralement à l'interface entre un métal et un milieu diélectrique (comme l'air ou un liquide) et se caractérise par une forte absorption de la lumière à des longueurs d'onde spécifiques, dépendant des caractéristiques du matériau et des conditions optiques.

Ce phénomène est devenu un outil incontournable dans les technologies modernes pour contrôler la lumière à l'échelle nanométrique. En particulier, il est largement exploité dans des domaines tels que la biotechnologie [5], la médecine [6] et la photonique [7]. Par exemple, en médecine, la RPS est utilisée dans les biocapteurs plasmoniques pour la détection de biomolécules, permettant ainsi de réaliser des diagnostics rapides et précis [8-9].

Dans le secteur aéronautique, la résonance plasmon de surface ouvre des perspectives prometteuses pour la détection précoce de défauts nanométriques au sein des matériaux composites et métalliques utilisés dans les structures aériennes. Grâce à la sensibilité exceptionnelle de la RPS aux variations des propriétés optiques des matériaux, il devient possible de détecter des fissures, des délaminations ou d'autres altérations nanométriques bien avant qu'elles ne deviennent critiques [10-12]. Par ailleurs, ce phénomène pourrait également contribuer à améliorer les performances des composites en intégrant des nanoparticules métalliques dans la matrice polymère, optimisant ainsi la durabilité et la résistance des structures composites utilisées dans l'aviation. En alliant l'expertise en matériaux avancés et en optique, la RPS représente un levier technologique majeur pour renforcer la sécurité, la maintenance prédictive et l'efficacité des avions modernes.

L'objectif de cette étude est donc, dans un premier temps, d'explorer les résonances plasmoniques des nano-sphères métalliques intégrées dans la matrice des composites PMC afin de détecter les variations de l'indice de réfraction environnant les nanoparticules. L'étude se concentre principalement sur le calcul de la réponse optique des nanoparticules sphériques en utilisant la théorie de Mie, dans deux configurations : celle d'un composite sain et celle d'un composite présentant des fissures nanométriques.

En définitive, cette approche permet de mieux comprendre les interactions lumière-matière dans des composites avancés, ouvrant la voie à de nouvelles stratégies de détection non destructive et à l'amélioration des performances structurelles dans l'aéronautique.

### 1.1 Approche théorique et Principe

Dans cette étude, nous nous intéressons aux propriétés optiques de particules sphériques hybrides cœur/coquille Ni/Au, dispersées dans un milieu connu, non absorbant, isotrope et homogène. Nous utilisons la **théorie de Mie** pour calculer les efficacités de diffusion d'une nanoparticule sphérique Ni/Au. Cette théorie, reconnue pour sa capacité à décrire de manière analytique le comportement optique d'une nanoparticule sphérique, est particulièrement pertinente dans le cadre de leur incorporation dans un composite PMC, où elles renforcent la matrice polymère (Fig. 1).

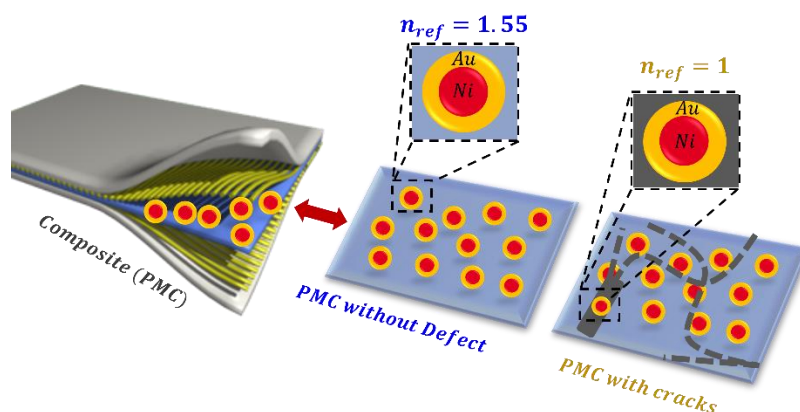


Fig. 1. Principe de détection de la présence des défauts dans un composite PMC.

La théorie de Mie fut établie au début du XXe siècle en 1908 par Gustav Mie [13], elle décrit de manière exacte les propriétés optiques de diffusion et d'absorption de la lumière par des petites particules [14].

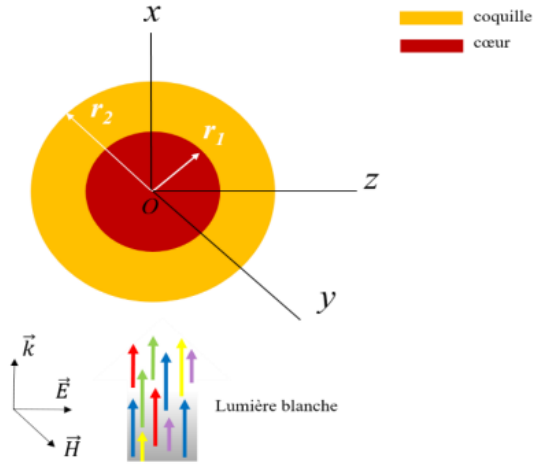


Fig. 2. Schéma d'une nanoparticule cœur/coquille dans l'espace reportée au système de coordonnées sphériques  $(x, y, z)$  est éclairée par une onde lumineuse plane polarisée en  $x$  se propageant le long de l'axe  $z$ .  $r_1$  et  $r_2$  sont les rayons du cœur et de la coquille, respectivement ;  $D = 2 r_2$  est le diamètre total de la nanoparticule.

Pour une nanoparticule sphérique (Fig. 2), une solution analytique des équations de Maxwell est disponible grâce à la théorie de Lorenz-Mie, bien documentée dans le livre de Bohren et Huffman [15]. Selon cette théorie, les efficacités de diffusion et d'absorption de la lumière par une nanocoquille sphérique sont données par :

$$Q_{sca} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (\text{Eq. 1})$$

$$Q_{abs} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} [(2n+1) R_e(a_n + b_n) - Q_{sca}] \quad (\text{Eq. 2})$$

$R_e$  désigne la partie réelle d'une quantité complexe,  $a_n$  et  $b_n$  sont les coefficients de Mie, et  $x = \frac{2\pi r_2}{\lambda}$  est le paramètre de taille à la longueur d'onde. En utilisant le logiciel MATLAB®, il est possible de calculer numériquement les coefficients de Mie, et par conséquent les efficacités de diffusion et d'absorption.

## 1.2 Réponse optique en diffusion d'une nanoparticule Ni/Au immergée dans un composite PMC intact et au sein d'une fissure interne

L'étude de la réponse optique des nanoparticules insérées dans des matériaux composites PMC, basée sur la théorie de Mie, constitue une approche théorique puissante pour évaluer les changements optiques induits par des défauts structurels tels que des fissures dans la matrice du composite. Cette méthode permet de modéliser et de simuler les interactions lumière-matière pour des nanoparticules sphériques, en tenant compte des variations de l'environnement optique autour de celles-ci.

Nous avons calculé les spectres d'efficacité de  $Q_{sca}$  en fonction de la longueur d'onde pour les trois cas différents comme illustré dans la Fig. 3a. Pour le spectre de diffusion de la nanoparticule Ni/Au placée dans une fissure ( $n_{ref} = 1$ ), nous observons l'apparition d'un pic situé à  $\lambda \sim 700$  nm, suivi d'une forte décroissance de l'efficacité de diffusion  $Q_{sca}$  dans la gamme infrarouge (IR). Ce comportement révèle que la nanoparticule diffuse fortement la lumière dans le domaine visible, mais son efficacité décroît rapidement au-delà de cette plage.

Dans le cas où la nanoparticule Ni/Au est partiellement immergée dans une fissure ( $n_{ref} = 1,25$ ), une tendance similaire est observée, mais l'intensité du pic est légèrement atténuée par rapport à celle enregistrée pour  $n_{ref} = 1$ . Cela suggère que le changement du milieu environnant diminue légèrement l'amplitude de la résonance plasmonique.

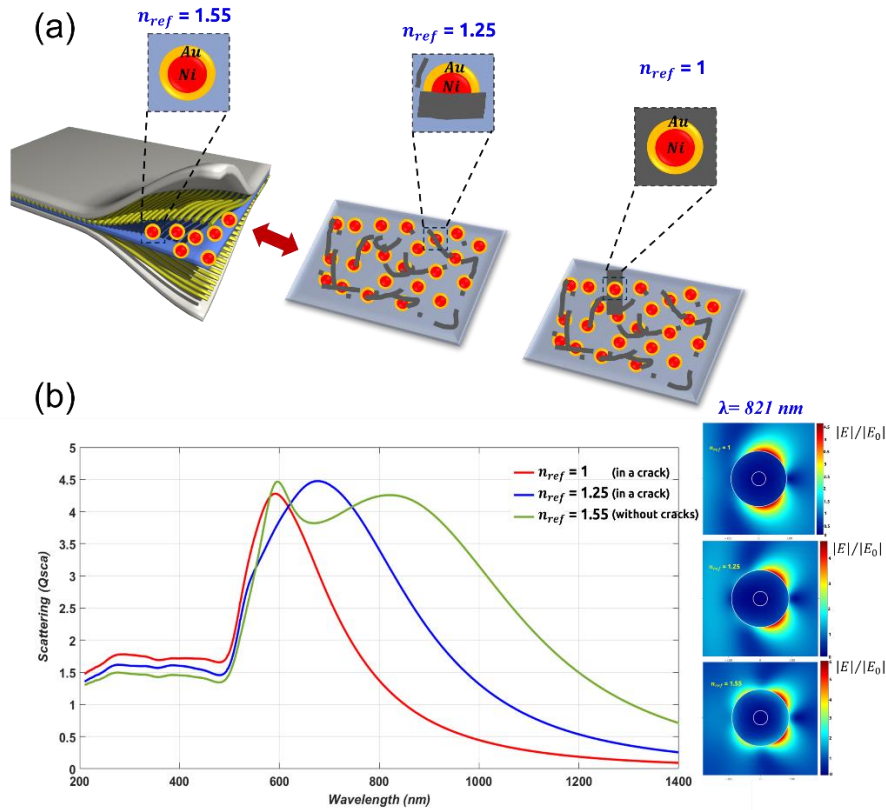


Fig. 3. Spectre de diffusion  $Q_{sca}$  pour une NP Ni/Au immergée dans une matrice résineuse pour différentes prises dans le défaut.

En revanche, lorsque la nanoparticule est entièrement intégrée dans la matrice saine de composite sain ( $n_{ref} = 1,55$ ), on observe un décalage du pic de résonance vers des longueurs d'onde plus élevées ( $\lambda \sim 750$  nm) et une efficacité de diffusion  $Q_{sca}$  globale plus faible par rapport aux autres configurations. Ce décalage vers le rouge et la diminution de  $Q_{sca}$  s'expliquent par l'interaction plus faible de la nanoparticule avec le milieu environnant plus homogène du composite, qui perturbe moins les résonances plasmoniques.

Ainsi, les résonances plasmoniques observées dépendent de l'indice de réfraction du milieu  $n_{ref}$ , et leur position est sensible aux variations de ce dernier. Plus l'indice de réfraction est élevé, plus les résonances sont décalées vers des longueurs d'onde plus grandes (effet de redshift), et leur amplitude diminue.

Nous avons également étudié les distributions des intensités relatives des champs électriques  $|E|/|E_0|$  autour de la nanoparticule pour  $\lambda = 821$  nm. Les résultats sont affichés dans la Fig. 3 sous forme de cartes couleur 2D.

- Pour  $n_{ref} = 1$  : la nanoparticule montre une concentration élevée d'intensité diffusée autour d'elle, avec un fort contraste entre les zones de forte et faible diffusion.
- Pour  $n_{ref} = 1,25$  : la répartition est similaire, mais la zone d'intensité maximale est légèrement réduite, montrant un affaiblissement de la diffusion avec un milieu à indice de réfraction intermédiaire.

- Pour  $n_{ref} = 1,55$  : l'intensité diffusée est beaucoup plus faible, indiquant que la nanoparticule dans le composite sain diffuse moins efficacement la lumière à cette longueur d'onde.

Cette analyse des spectres optiques met en évidence la sensibilité des nanoparticules Ni/Au aux variations de l'indice de réfraction du milieu environnant.

Cette méthode innovante pourrait grandement améliorer la sensibilité et l'efficacité des techniques de détection et de suivi des défauts dans les matériaux composites, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles applications dans les secteurs de haute technologie.

## Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur sincère gratitude à Emilien BOURDON et Alan JEAN-MARIE pour leur soutien et leur compréhension quant à l'importance de participer à cette conférence JNC 2025. Leur encouragement a été essentiel à la réussite de cette participation.

## Références

- [1] Chen, Yong, and Hai Ming. "Review of surface plasmon resonance and localized surface plasmon resonance sensor." *Photonic Sensors* 2 (2012) : 37-49.
- [2] Rodrigues, Marco S., et al. "Gas sensors based on localized surface plasmon resonances: Synthesis of oxide films with embedded metal nanoparticles, theory and simulation, and sensitivity enhancement strategies." *Applied Sciences* 11.12 (2021): 5388.
- [3] Krishchenko, I. M., et al. "Resonant optical phenomena in heterogeneous plasmon nanostructures of noble metals: a review." *Theoretical and Experimental Chemistry* 56.2 (2020): 67-110.
- [4] Wahyuni, Sari, et al. "Localized surface plasmon resonance properties dependence of green-synthesized fe<sub>3</sub>o<sub>4</sub>/ag composite nanoparticles on ag concentration and an electric field for biosensor application." *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications* 57 (2023): 101191.
- [5] Camarca, Alessandra, et al. "Emergent biosensing technologies based on fluorescence spectroscopy and surface plasmon resonance." *Sensors* 21.3 (2021): 906.
- [6] Hadded, Maha. *Étude des propriétés optiques des nanomatériaux hybrides magnéto-plasmoniques*. Diss. Troyes, 2022.
- [7] Chamanzar, Maysamreza, et al. "Hybrid integrated plasmonic-photonic waveguides for on-chip localized surface plasmon resonance (LSPR) sensing and spectroscopy." *Optics express* 21.26 (2013): 32086-32098.
- [8] Faridfar, Ghazale, et al. "Immunodiagnostic of Vibrio cholerae O1 using localized surface plasmon resonance (LSPR) biosensor." *International Microbiology* 24 (2021): 115-122.
- [9] Söylemez, Cansu. *Design of localized surface plasmon resonance (LSPR) based biosensor for detecting a potential cancer biomarker*. MS thesis. Izmir Institute of Technology (Turkey), 2020.
- [10] Ding, Xianguang, et al. "Surface plasmon resonance enhanced light absorption and photothermal therapy in the second near-infrared window." *Journal of the American Chemical Society* 136.44 (2014): 15684-15693.
- [11] Chirico, Giuseppe, Piersandro Pallavicini, and Maddalena Collini. "Gold nanostars for superficial diseases: a promising tool for localized hyperthermia?." *Nanomedicine* 9.1 (2014): 1-3.
- [12] Doiron, Brock, et al. "Quantifying figures of merit for localized surface plasmon resonance applications: a materials survey." *Acs Photonics* 6.2 (2019): 240-259.
- [13] Abou-Khousa, Mohamed A., et al. "Detection of surface cracks in metals using microwave and millimeter-wave nondestructive testing techniques—a review." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 72 (2023): 1-18.
- [14] Su, Piqiang, et al. "Method of defects detection in non-metallic composites based on liquid flow controlled spoof surface plasmon polaritons." *IEEE Sensors Journal* 21.12 (2021): 13239-13246.
- [15] Podunavac, Ivana, et al. "Microwave spoof surface plasmon polariton-based sensor for ultrasensitive detection of liquid analyte dielectric constant." *Sensors* 21.16 (2021): 5477.