



kwan-tek

# Magnétométrie NV pour le Contrôle non Destructif

Kwan-tek

Baptiste Vindolet, ingénieur R&D

[baptiste.Vindolet@kwan-tek.com](mailto:baptiste.Vindolet@kwan-tek.com)

18-09-2024

# KWAN-TEK : a Quantum Sensing Deep Tech Startup



📍 Founded in **April 2020** (Lorient, France) after 13 years experience in quantum metrology



Metrology solutions based on **diamond quantum sensors**



First French SME developing diamond quantum sensors identified by the **European strategy in quantum technologies**

**7 Patents**

**24 staff**

- 17 in R&D
- including 5 PhD
- All skills present

## Recognitions and Partnerships



i-Lab

PHOTONICS  
BRETAGNE



LA  
PLACE  
STRATÉGIQUE



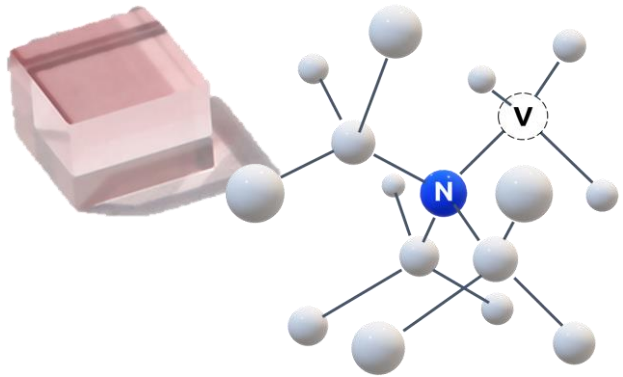
université  
PARIS-SACLAY



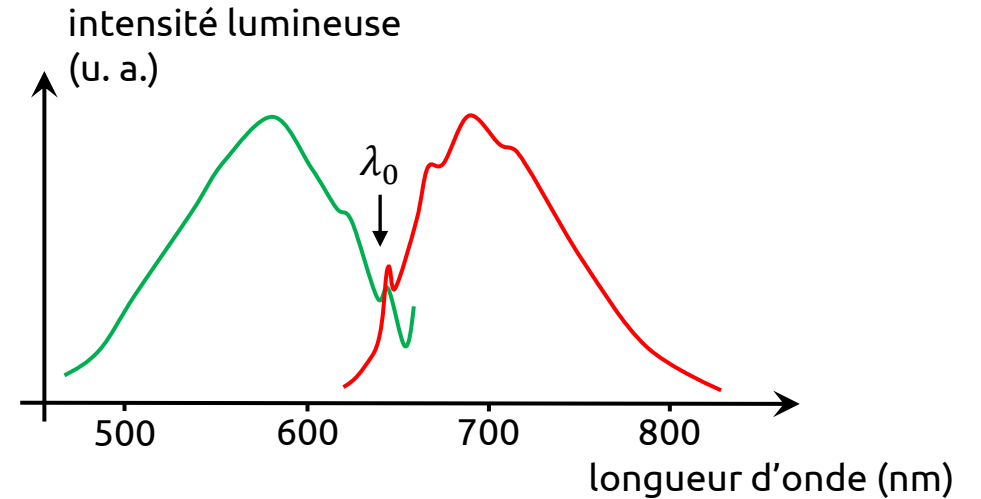
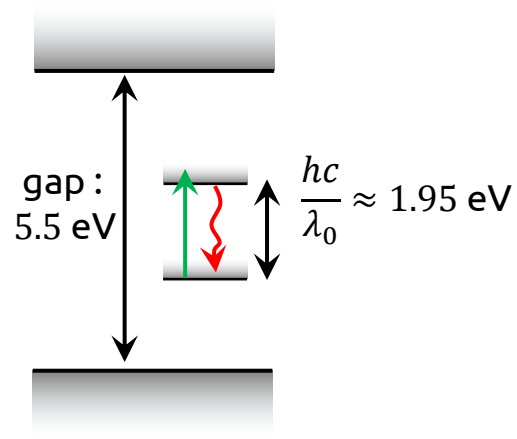
*Secured innovation grants : 1.1 m€ (past) + 1.9 m€ (future)*

# Le centre NV du diamant

Le centre NV est défaut atomique du diamant, parfaitement photostable

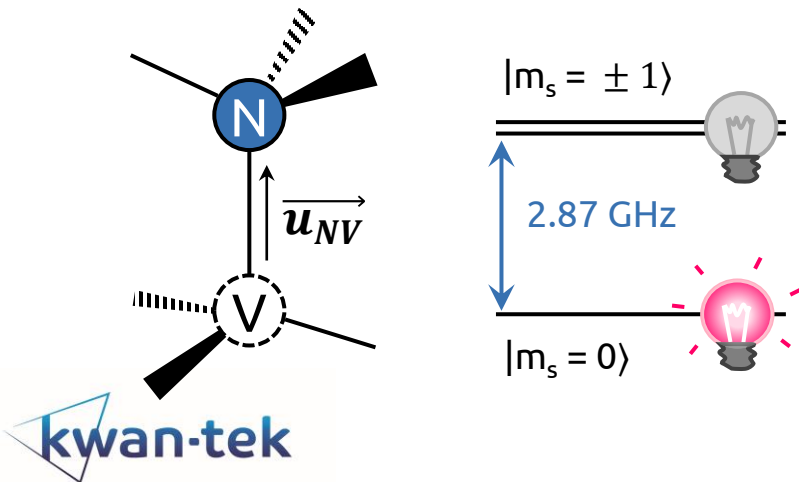


NV : Nitrogen Vacancy



Spin électronique  $S=1$ , adressable optiquement

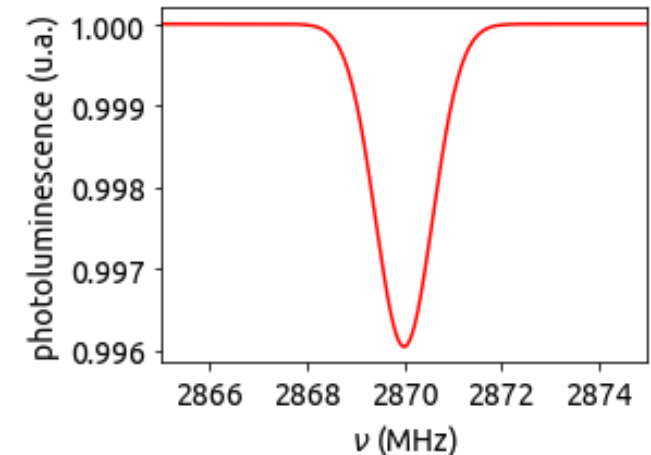
Résonance magnétique détectée optiquement (ODMR)



## 2 propriétés fondamentales :

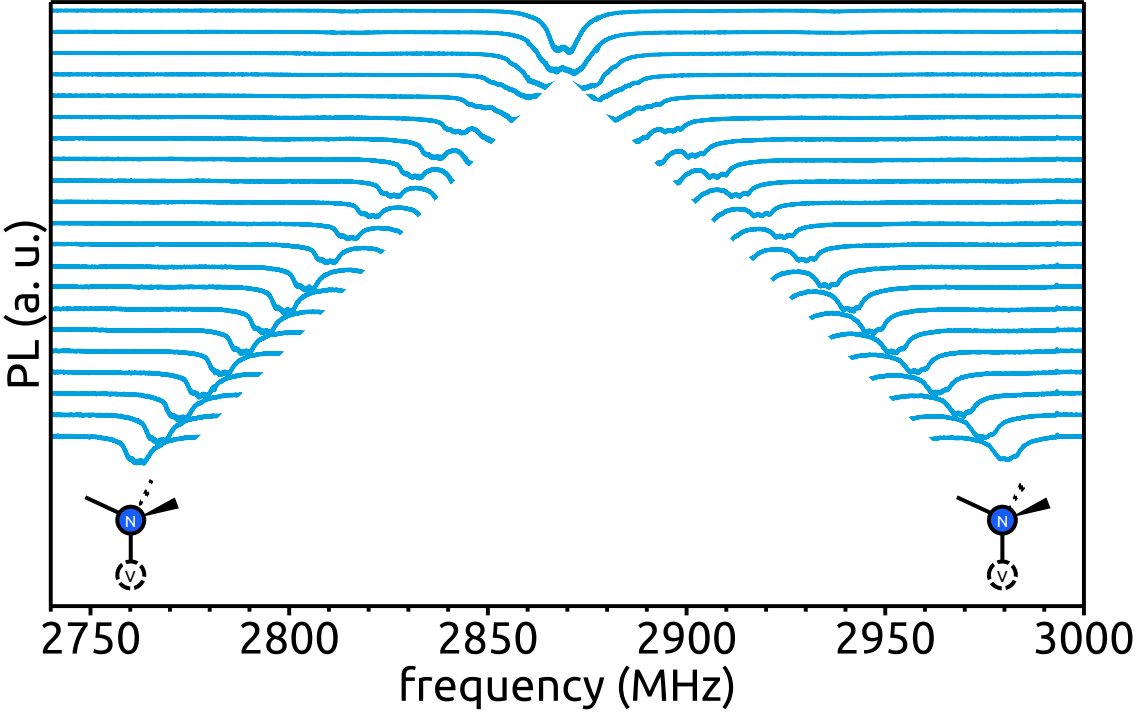
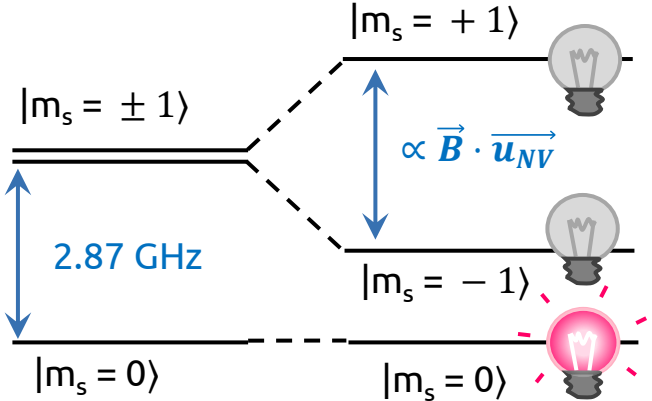
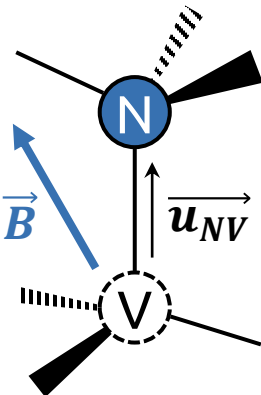
Sous illumination verte

- Initialisation dans  $|m_s = 0\rangle$
- Lecture optique



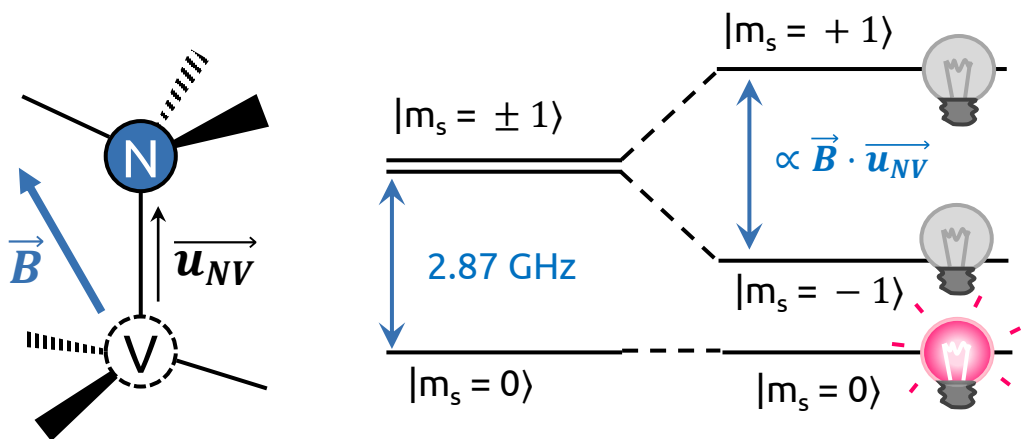
# Magnétométrie NV

En présence d'un champ magnétique : levée de dégénérescence entre + 1 et -1 (effet Zeeman)

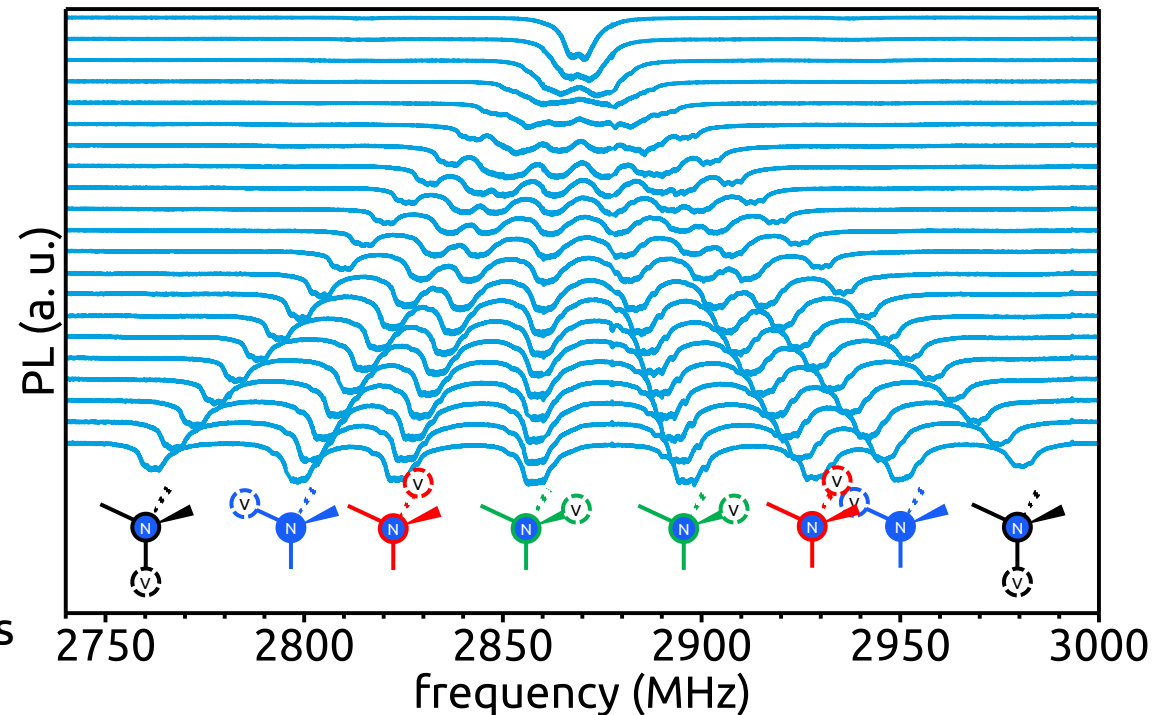


# Magnétométrie NV

En présence d'un champ magnétique : levée de dégénérescence entre +1 et -1 (effet Zeeman)



Cas d'un diamant très dopé :  
4 orientations possibles, ie. 4 paires de résonances



## Un diamant massif est un excellent magnétomètre

- Haute résolution, petite dimension (10 ~ 100  $\mu\text{m}$ )
- Vectoriel (3 axes)
- Quantitatif et absolu (pas de calibration)
- Sensible ( $\leq \text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ )
- Robuste

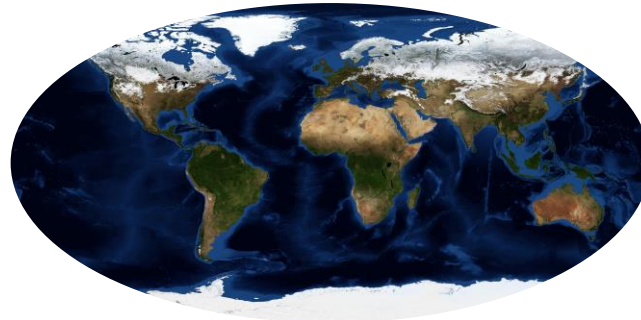
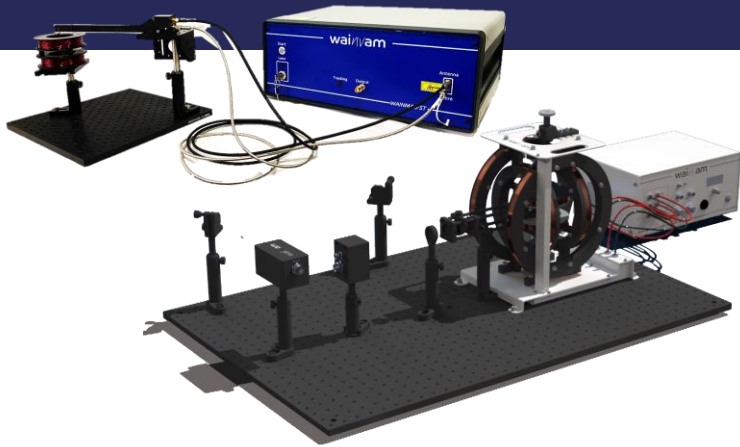
# Développement de nouvelles applications

Un diamant massif est un excellent magnétomètre (résolu, sensible, sans calibration, robuste)

Instrumentation scientifique  
et enseignement

Navigation & détection

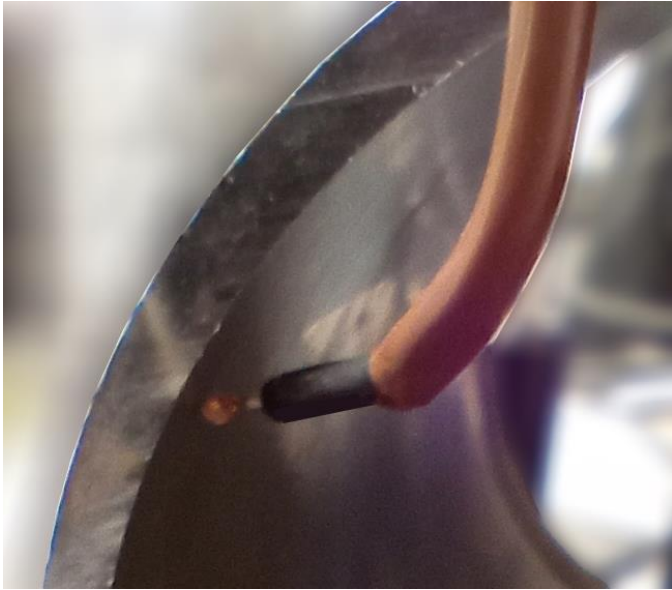
Contrôle non destructif



# Magnétométrie NV pour le CND

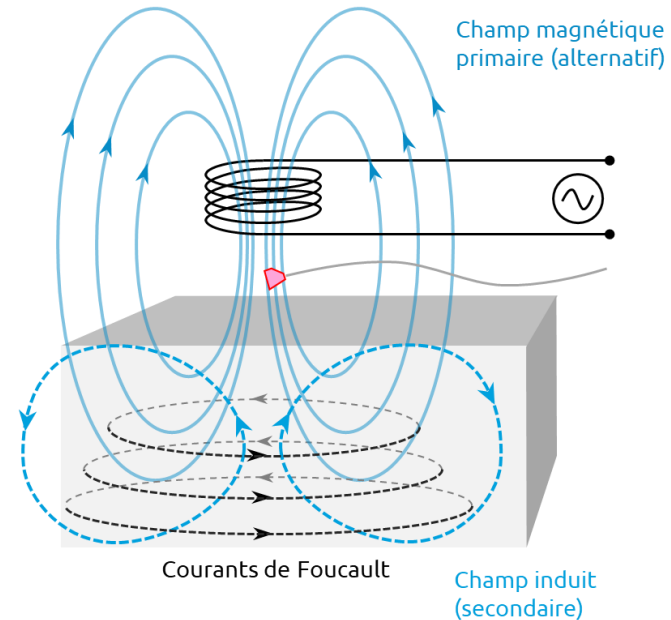
But : utiliser le NV comme capteur dans les méthodes de contrôle reposant sur le champ magnétique

## Mesure de champs de fuite (MFL)



Premières preuves de principe  
Optimisation et automatisation en cours

## Courants de Foucault



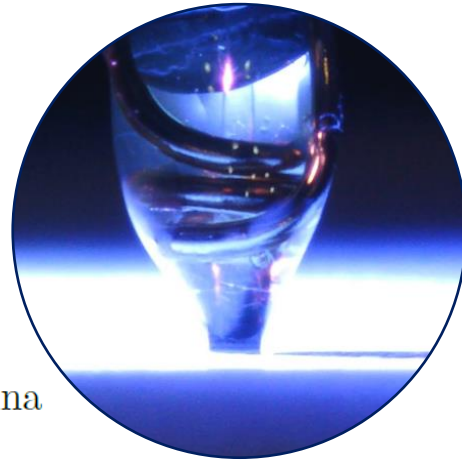
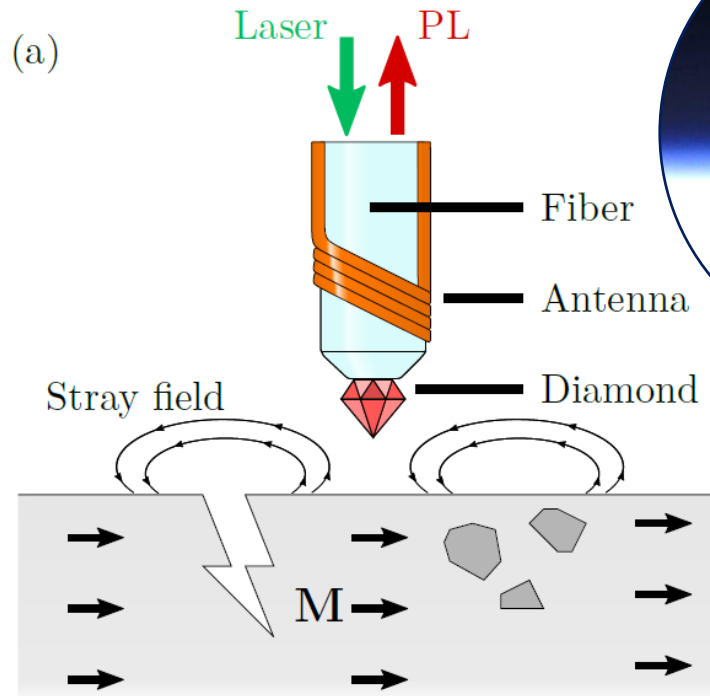
Développement en cours



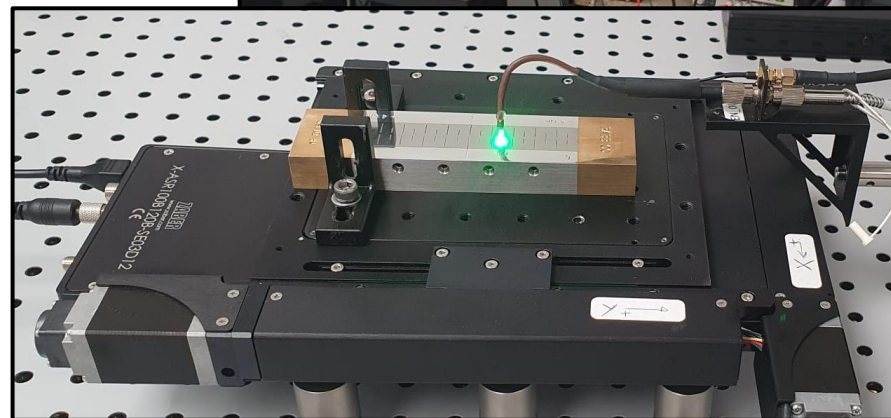
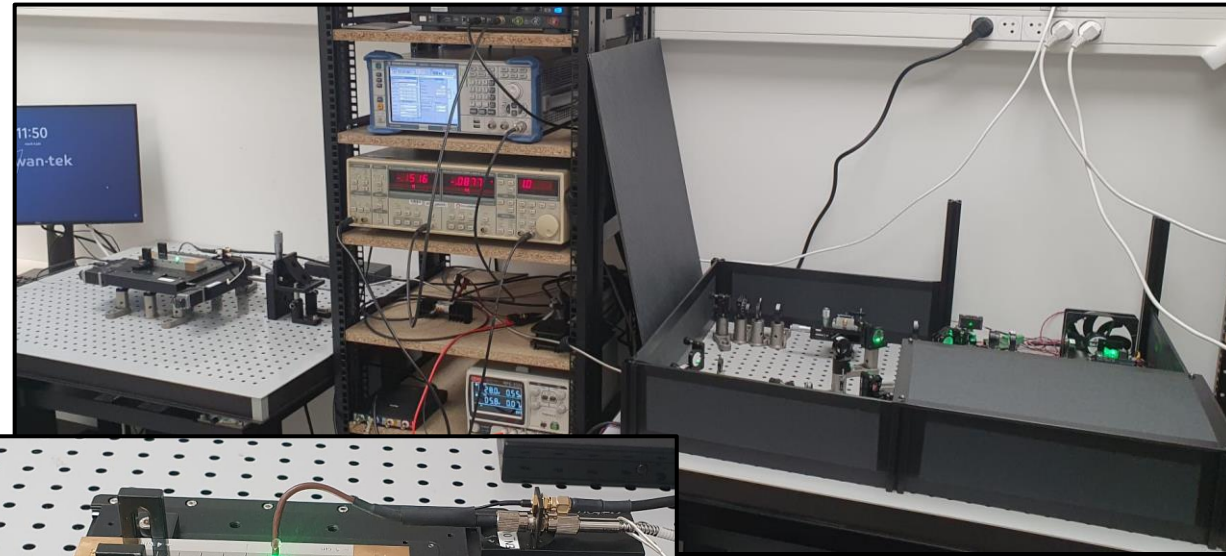
# Magnétométrie NV - mesure de champs de fuite

**Principe** : des défauts ponctuels (fissures, contraintes, ...) dans une pièce en acier donnent lieu à des champs de fuite (dès que  $\text{div}(\vec{M}) \neq 0$ )

**Objectif** : scanner un magnétomètre à proximité de la pièce pour mesurer les champs de fuite et détecter les défauts.



**Banc de test**

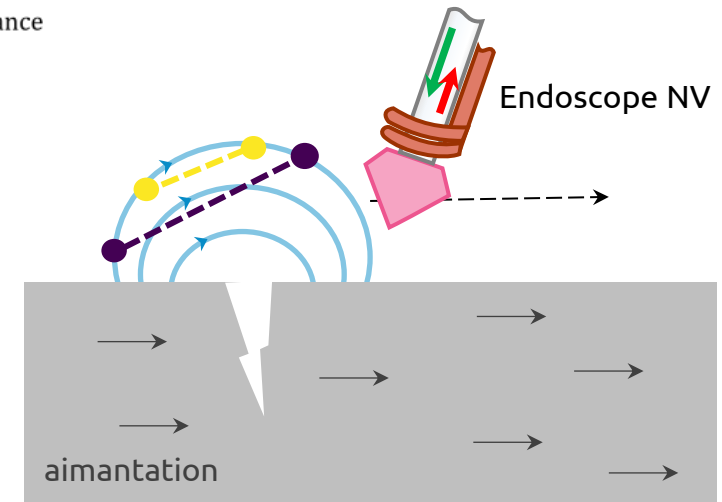
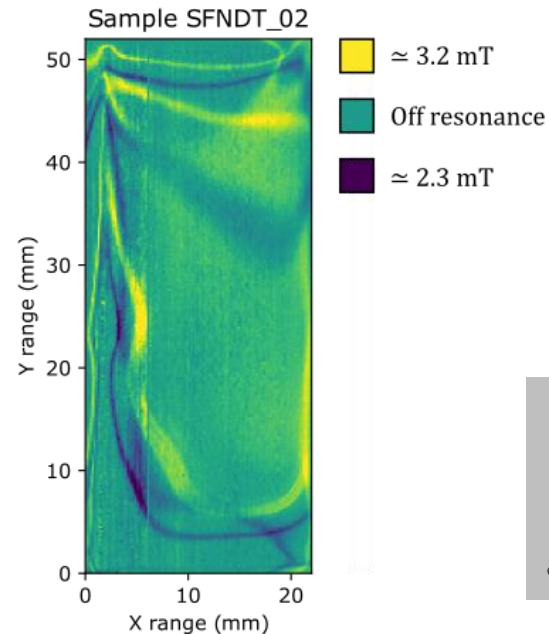
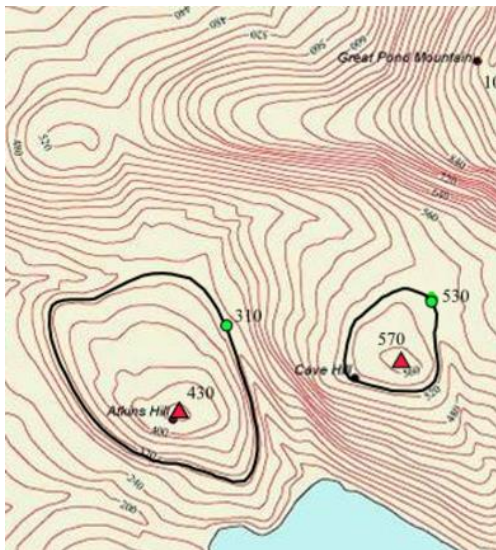


# Cartes rapides : iso-champ (iso-B)

Les cartes de champ sont obtenues en fixant la fréquence micro-onde.

On observe des **contours de champ**, correspondant à **une valeur et une projection du champ magnétique**.

Cf. cartes de relief.

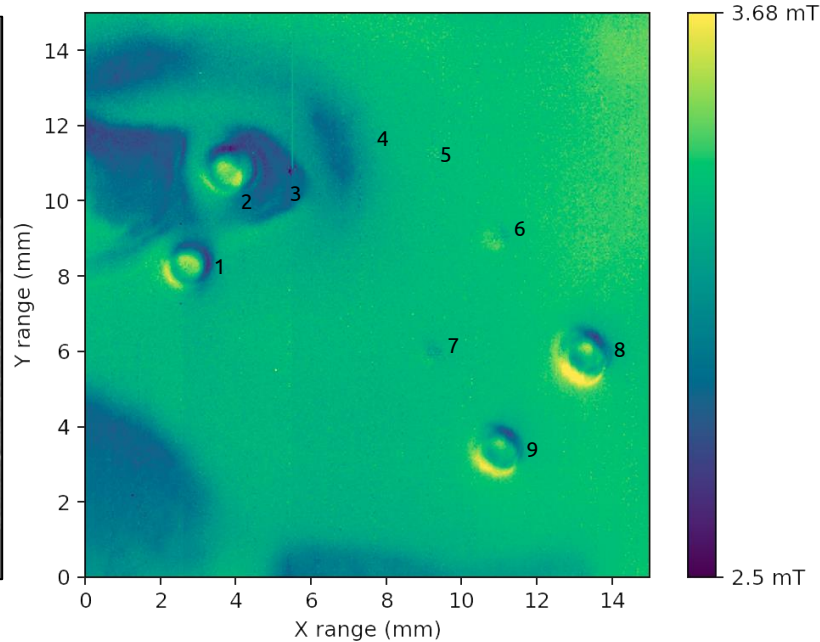
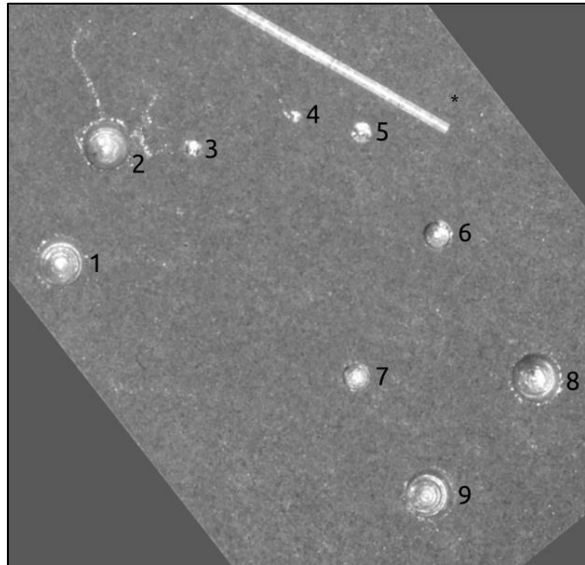


Une carte iso-champ avec un capteur massif contient l'information magnétique, de manière **vectorielle et quantitative**.

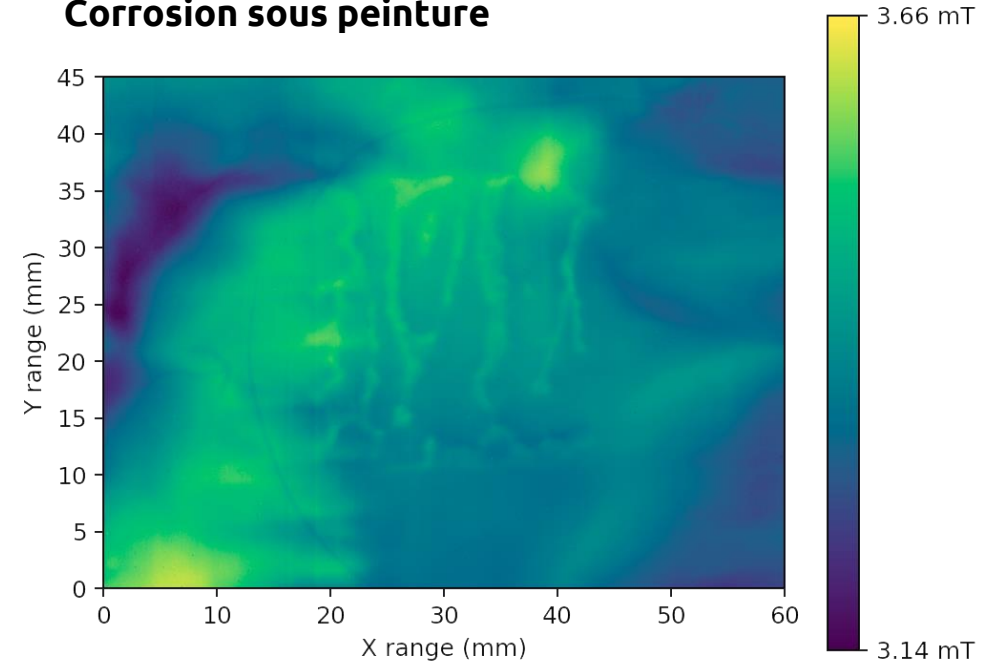
# Exemple de résultats (1)

## Détection et quantification de petits défauts par imagerie de champ de fuite

**Piqûre de corrosion**



**Corrosion sous peinture**



Trous de diamètres compris entre 200  $\mu\text{m}$  et 1.4 mm.

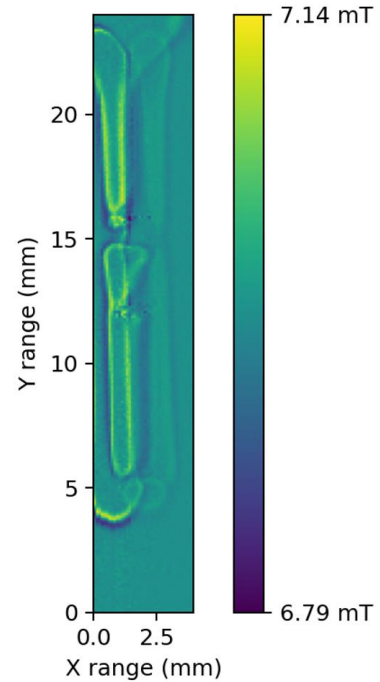
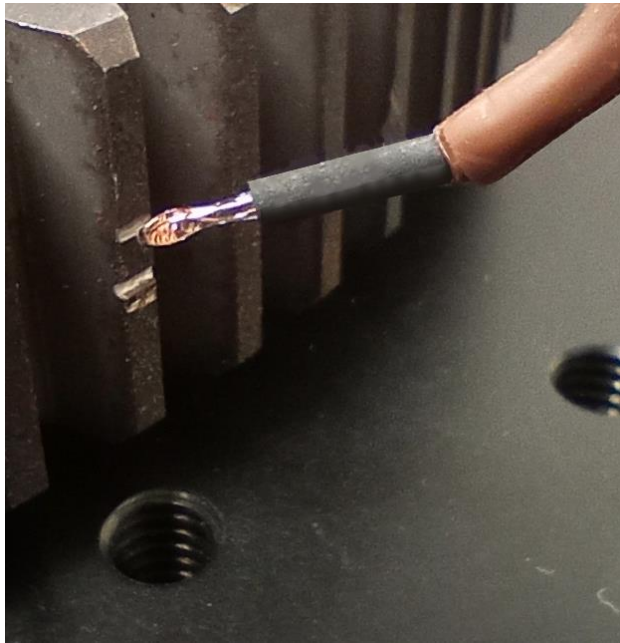
Images réalisées à remanence.



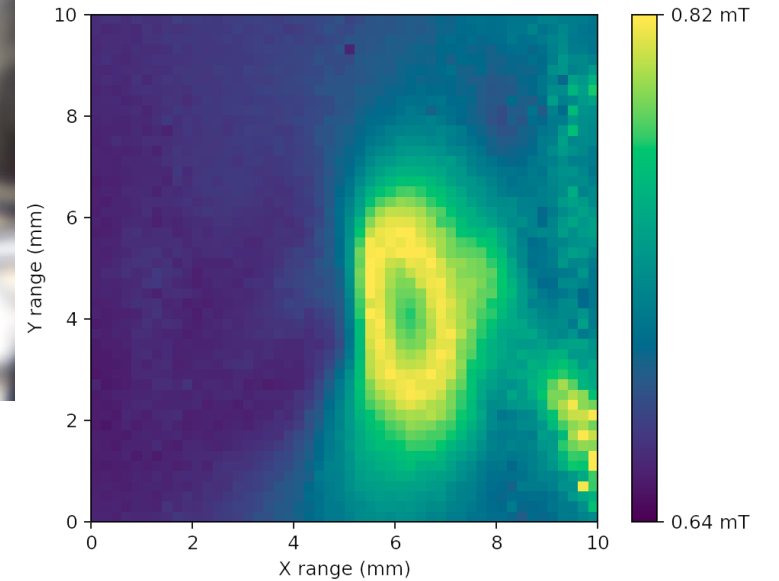
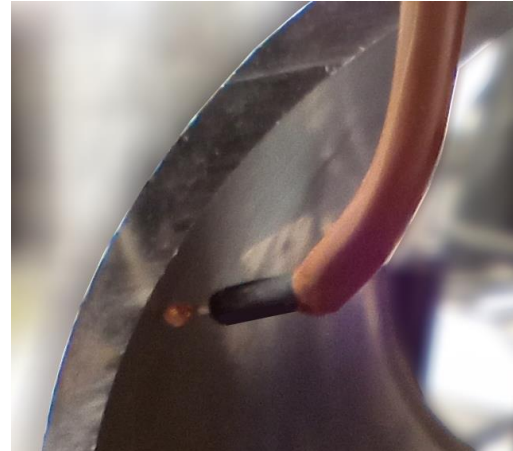
# Exemple de résultats (2)

## Défauts dans des géométries complexes

Dent d'engrenage abîmée

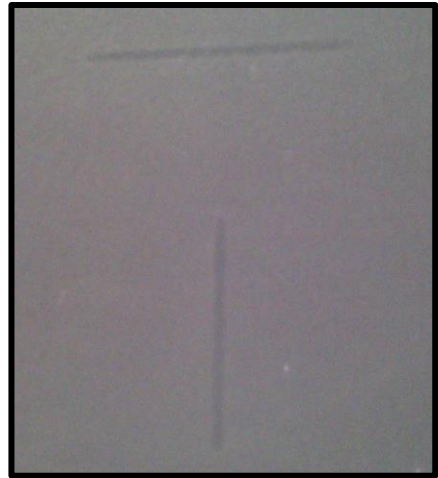
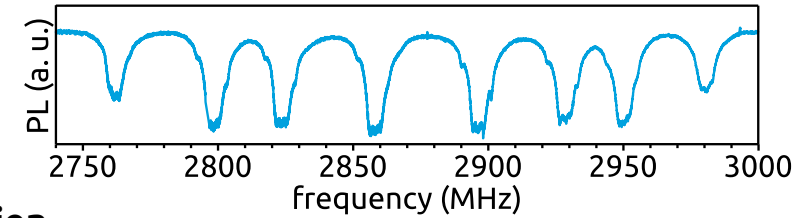


Trou sub-millimétrique dans un tube en acier 300M

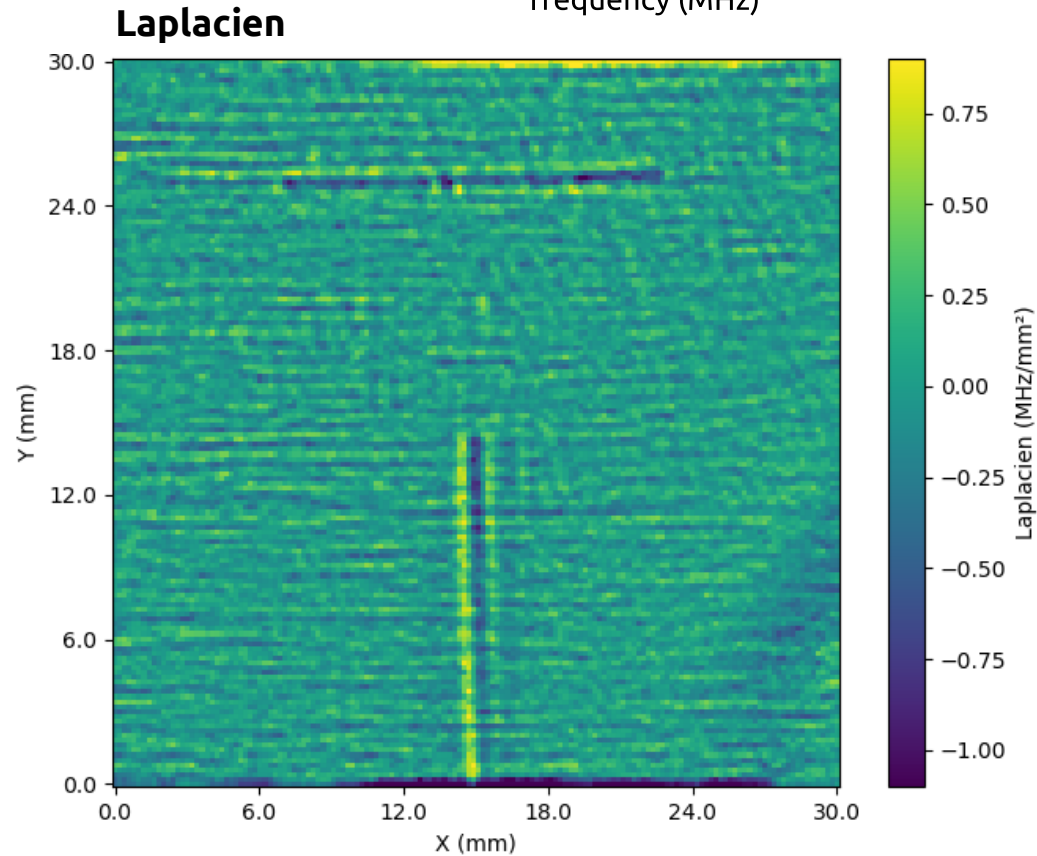
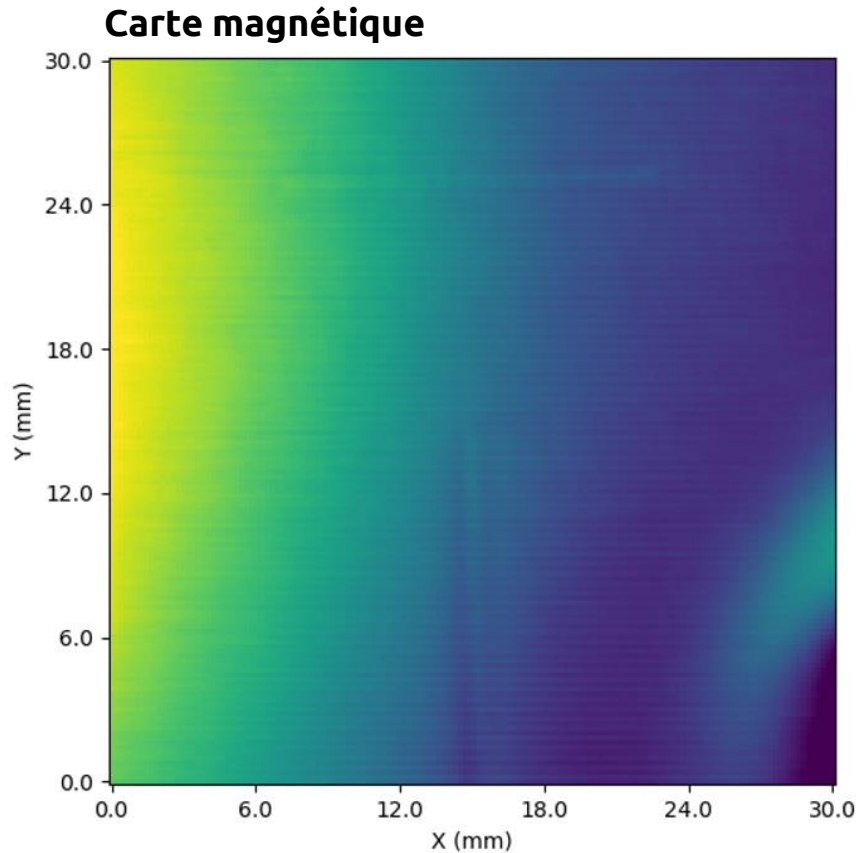


# Cartes rapides et quantitative : Suivi de la raie ODMR

## Brûlure de rectification dans un acier 300M



Photographie



cadence des mesures : 10 kHz.

# Intérêts de la magnétométrie NV pour la MFL

## Détection efficace et fiable

- Grande sensibilité ( $< \text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ )
- Grande résolution ( $< 10 \mu\text{m}$  atteignable)
- Capteur magnétique quantitatif et sans calibration
  - Mesure digitale

## Implémentation simple

- Sonde de petite dimension ( $\sim \text{mm}$ )  $\Rightarrow$  accès à des géométries difficiles
  - Prêt à utiliser (pas besoin de couplant, de préparation)
- Détection au travers des couches de peinture, revêtements...

# Magnétométrie NV – champs de fuite

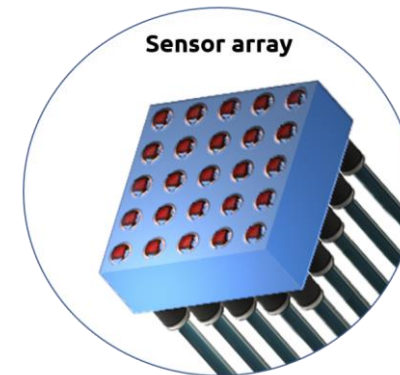
Prochaines étapes :

→ Mesures limitées par le déplacement mécanique (inspection d'une pièce en quelques secondes) :

- Augmenter la cadence des mesures (limitation fondamentale à 1 – 10 MHz).
- Améliorer les performances (sensibilité, résolution) en perfectionnant les endoscopes.
- Matrice de capteurs modulaire.

→ Interprétation directe :

- Modéliser les défauts
- Scanner des banques de défauts

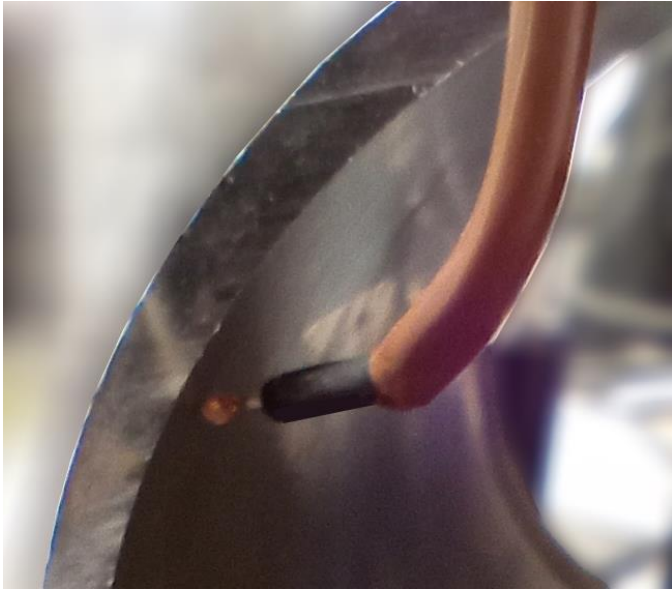


Brevet n° WO/2023/285402

# Magnétométrie NV pour le CND

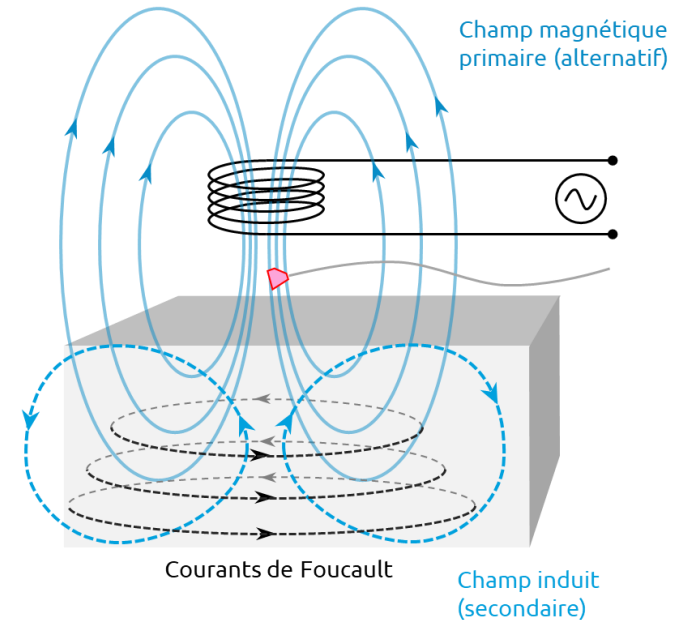
But : utiliser le NV comme capteur dans les méthodes de contrôle reposant sur le champ magnétique

## Mesure de champs de fuite (MFL)



Premières preuves de principe  
Optimisation et automatisation en cours

## Courants de Foucault

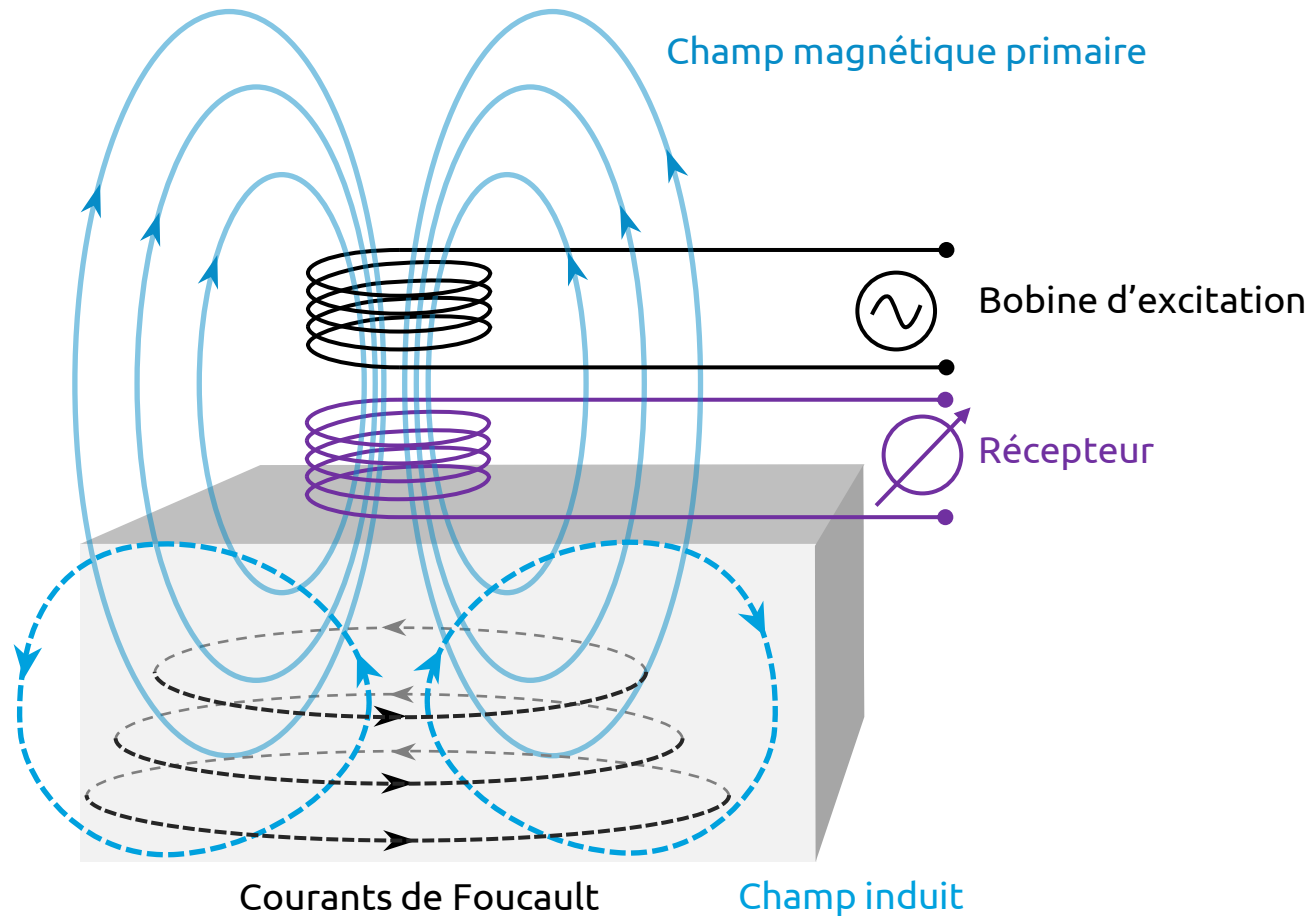


Développement en cours

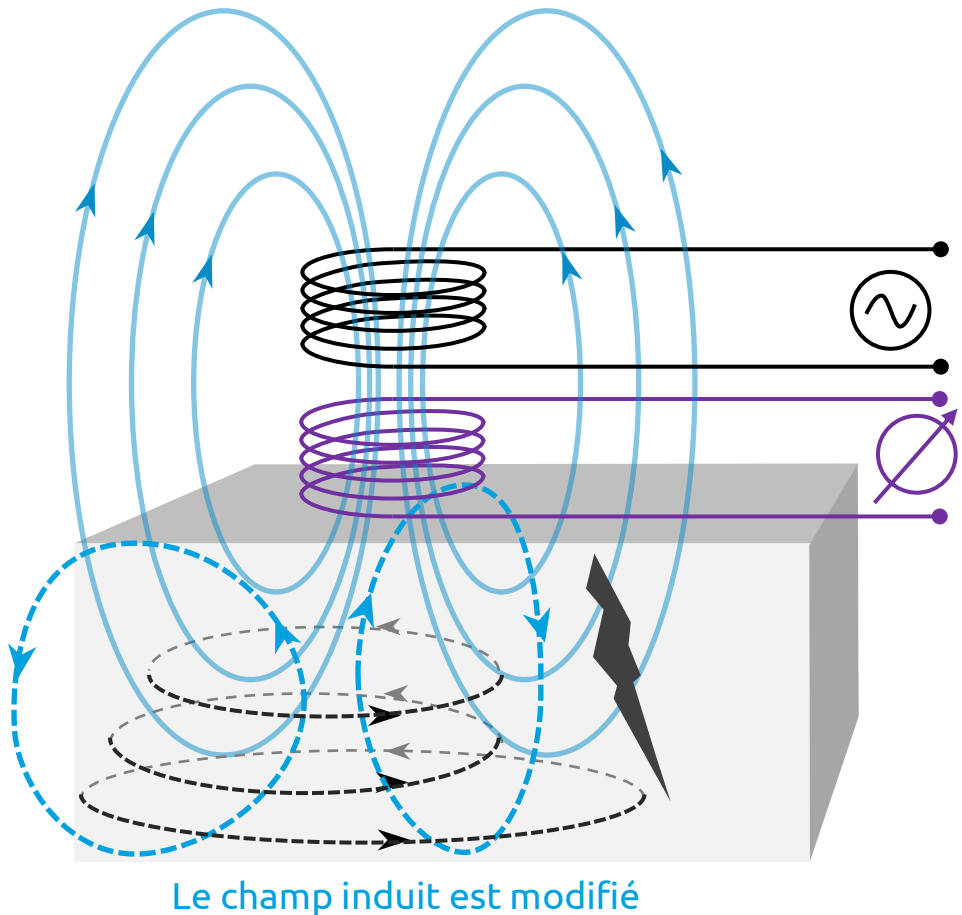


# Principe d'une mesure par courants de Foucault

Matériau sain

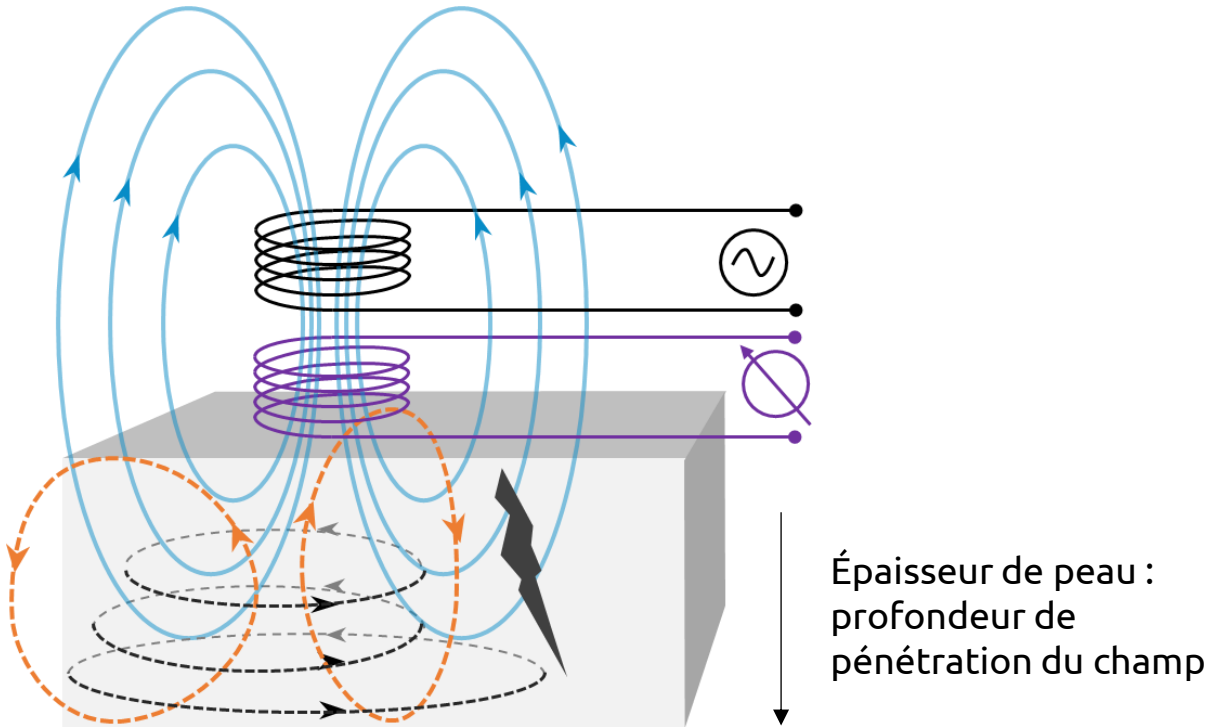


Présence d'un défaut

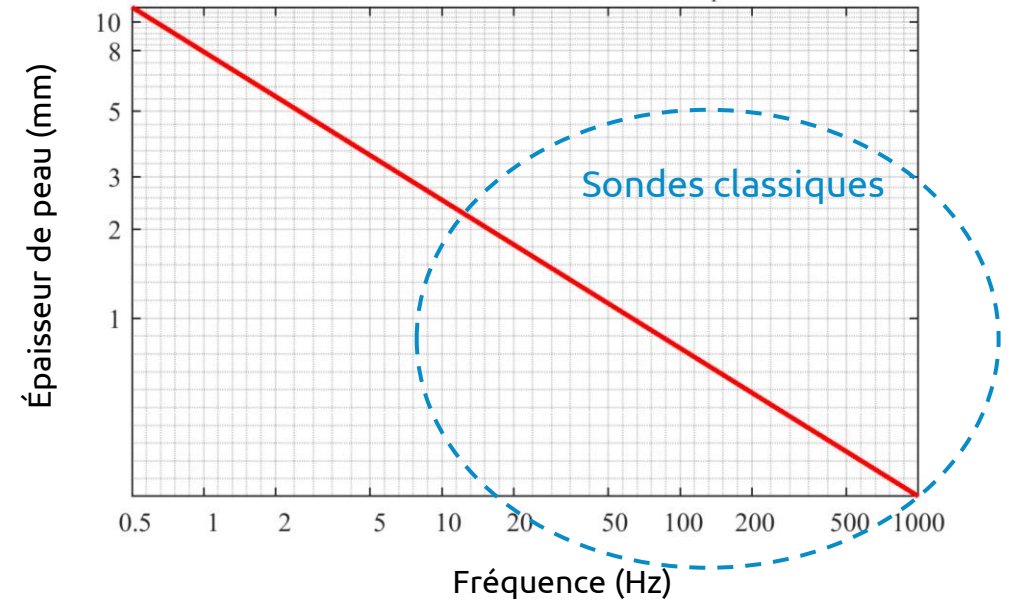


# Principe d'une mesure par courants de Foucault

→ On peut sonder différentes profondeurs du matériau en faisant varier la fréquence d'excitation.



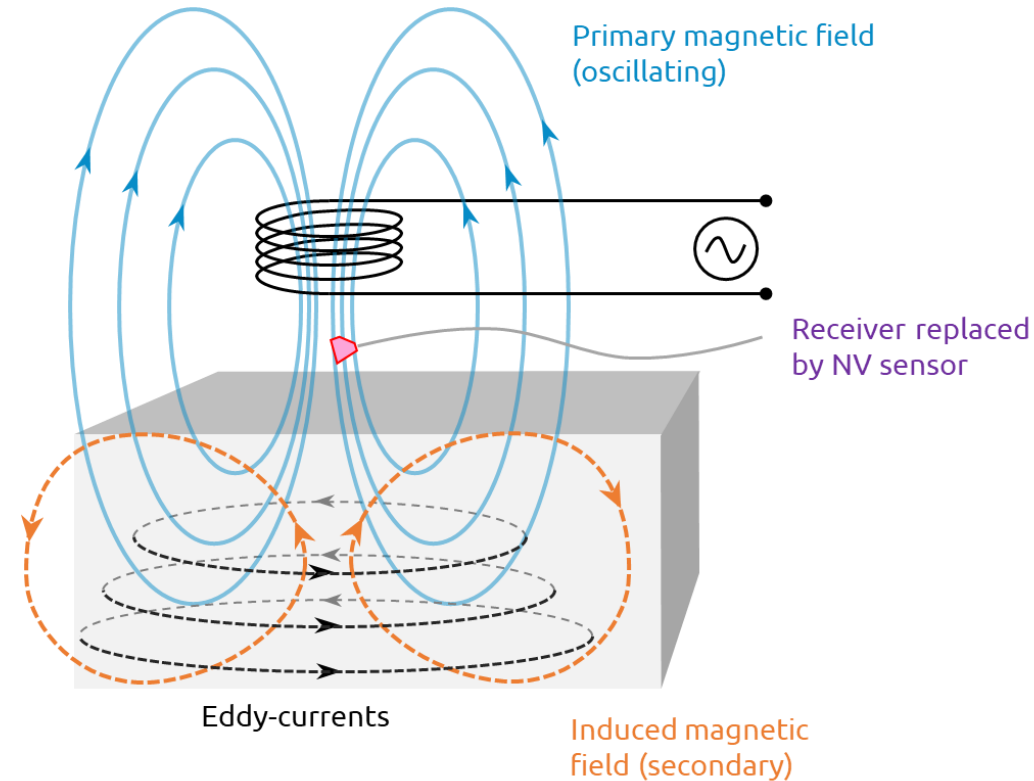
Exemple - acier 300M  
 $\sigma = 4 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ ,  $\mu_r = 1000$



⇒ Il faut diminuer la fréquence pour mesurer plus en profondeur dans les acier.  
Le signal  $B_{\text{induit}}$  est plus faible et le bruit augmente (bruit en  $1/f$ ).

# NV pour les courants de Foucault

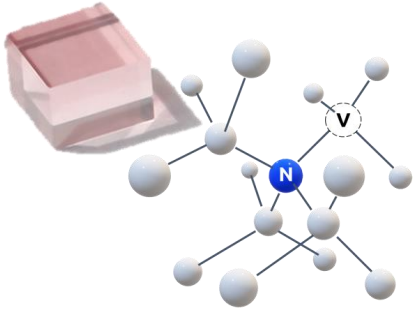
## Avantages NV pour les courants de Foucault :



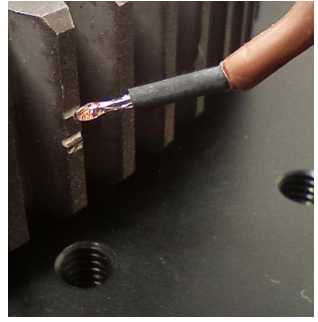
- Augmenter la résolution (compromis sensibilité/résolution avec les capteurs classiques).
- Augmenter la profondeur de mesure (limitation en sensibilité à basse fréquence avec les capteurs classiques).

	Classical sensors	NV
Profondeur de mesure (ex. acier)	~ 1-3 mm	~ 10 mm
Résolution en champ magnétique	~ 1 mm	< 100 $\mu\text{m}$

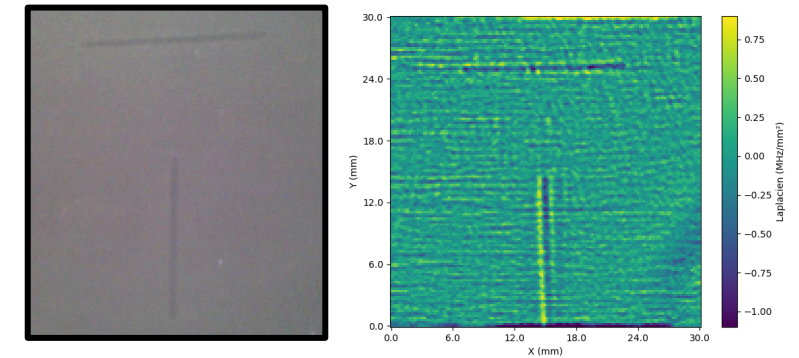
# Conclusion



- Les centres NV du diamant combinent plusieurs avantages : grande résolution ( $\leq 100 \mu\text{m}$ ), sensible ( $< \text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ), implémentation simple et sans calibration.

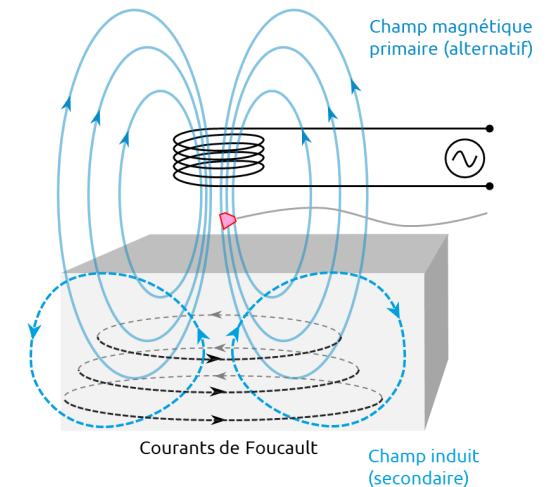


- Nous tirons profit des avantages du NV pour le contrôle non destructif de défauts dans des pièces métalliques (trains d'atterrissage, brûlure de rectification, couche blanche etc.).



## Prochaines étapes :

- Automatisation et optimisation des mesures de champs de fuite par magnétométrie NV sur des cas d'usages précis.
- Intégration des mesures par courants de Foucault.





Visit our website ...



Your contact email address here or [sales@KWAN-TEK.com](mailto:sales@KWAN-TEK.com)

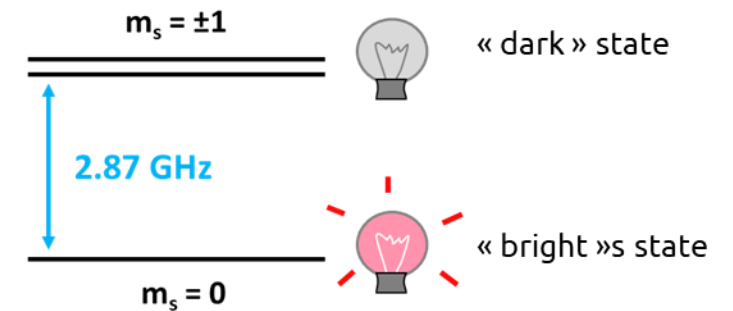
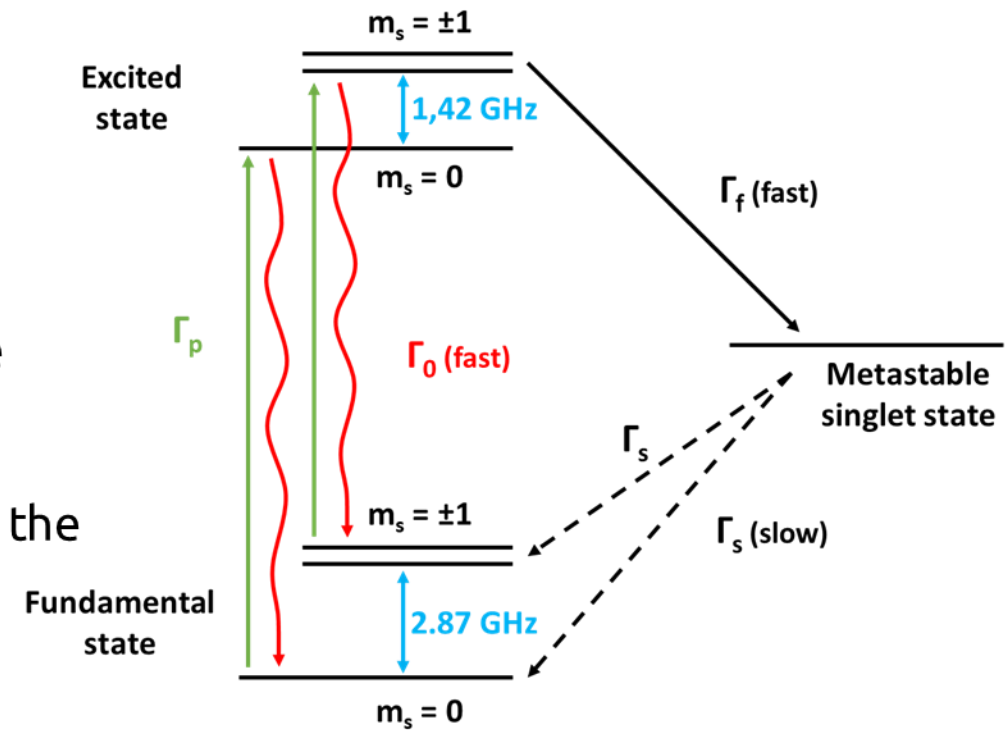




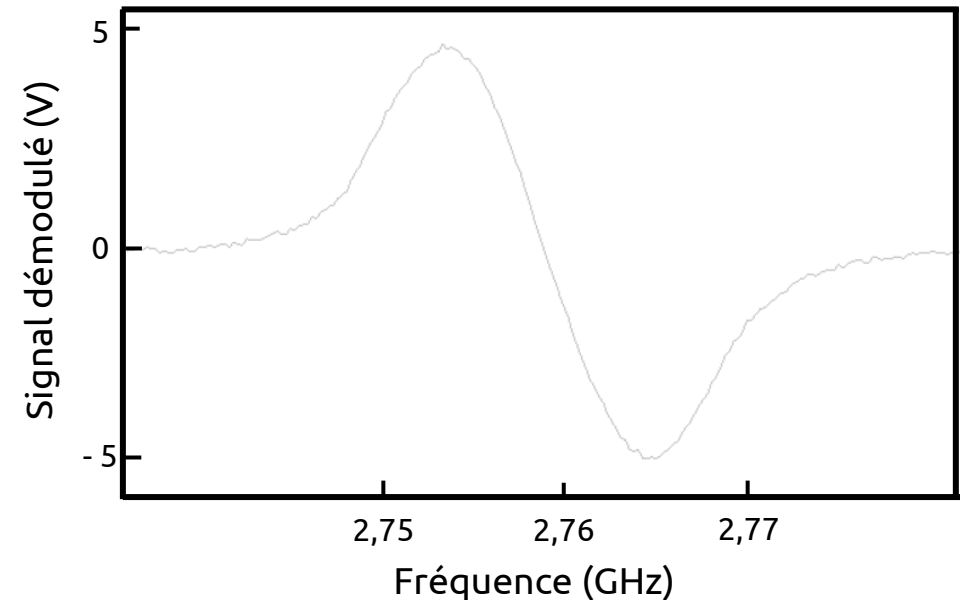
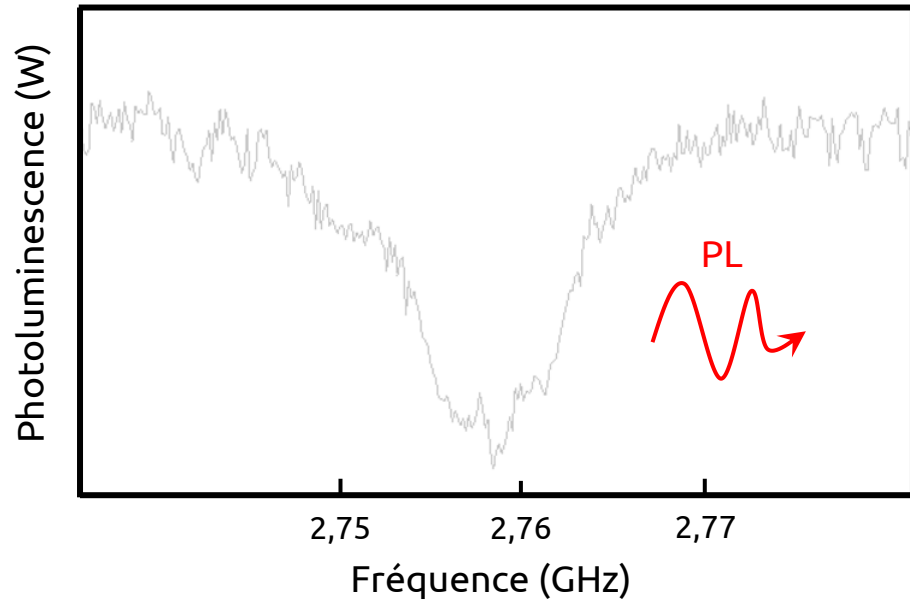
*Appendix: technical  
slides*

# NV centre atomic levels

- The NV centre has an overall electron spin  $S=1$ .
- The ground and excited states are electron spin triplets, characterised by the quantum number  $m_s$ , which can take on the values 0, +1 or -1.
- A NV centre in the  $m_s = 0$  state will tend to cycle between the excited and ground states.
- A NV centre in the excited  $m_s = \pm 1$  states has a non-negligible probability of decaying into the metastable state, without emitting a red photon.
- **Under green light excitation, the NV centre exhibits two important properties:**
  - the NV centre polarises in the  $m_s = 0$  state
  - the  $m_s = 0$  state emits more light than the  $m_s = \pm 1$  states



# Tracking de la raie ODMR



- On module la fréquence micro-onde autour de la raie ODMR.
- On fait une rétroaction PID sur la fréquence micro-onde pour maintenir l'amplitude du signal démodulé à 0 V → On suit la position de la raie en continue !



# Exemples récents dans la littérature

## Burst Eddy Current Testing with a Diamond Magnetometry

Chang Xu<sup>1</sup>, Jixing Zhang<sup>1\*</sup>, Heng Yuan<sup>1,2\*</sup>, Guodong Bian<sup>1</sup>, Pengcheng Fan<sup>1</sup>, and Minxin Li<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

<sup>2</sup>Research Institute of Frontier Science, Beihang University, Beijing 100191, China;

\*[zhangjixing@buaa.edu.cn](mailto:zhangjixing@buaa.edu.cn); [hengyuan@buaa.edu.cn](mailto:hengyuan@buaa.edu.cn).

