



# Aspects physiques de la séparation des nanoparticules magnétiques

**Pavel Kuzhir**

**Cécilia Magnet**

**Yassine Bouras, Sébastien Nave**

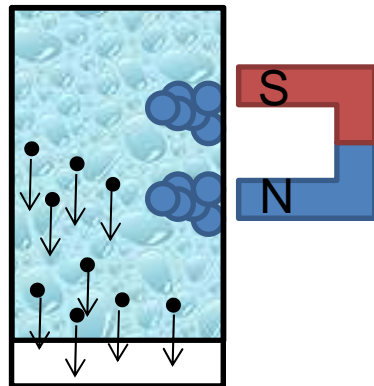
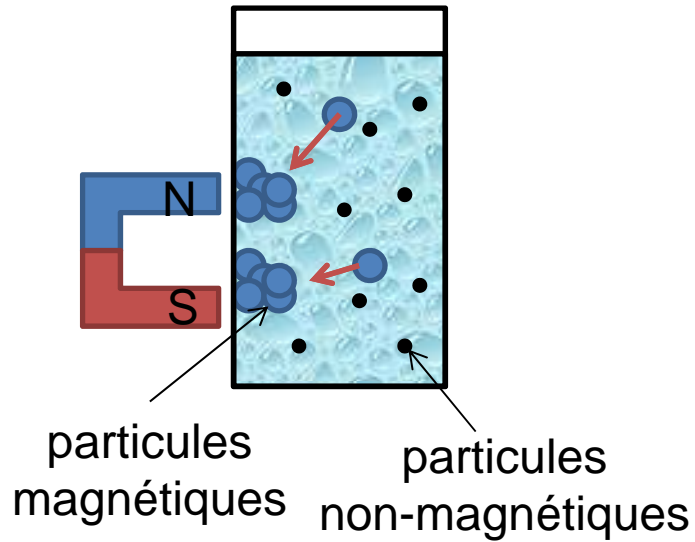
**Georges Bossis**

**Jacques Persello, Alain Meunier**

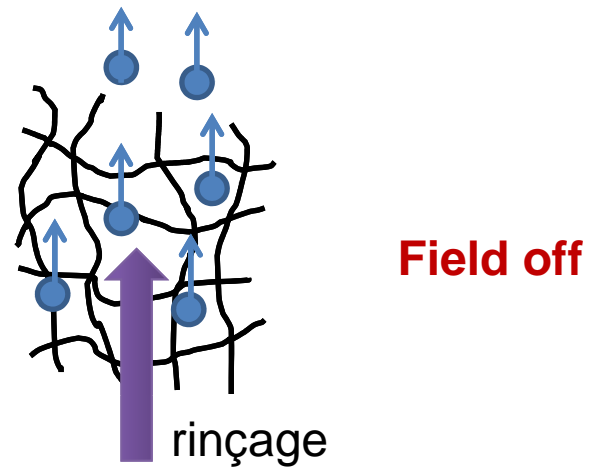
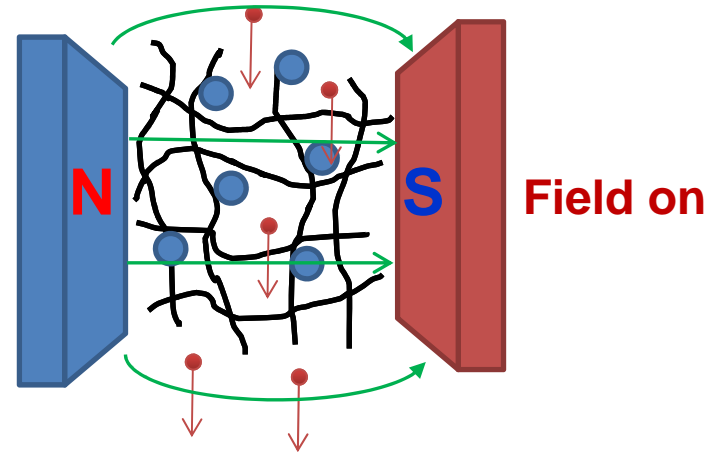
**Groupe: Fluides et Matériaux Complexes**

# Séparation des particules magnétiques

Captage par des aimants permanents

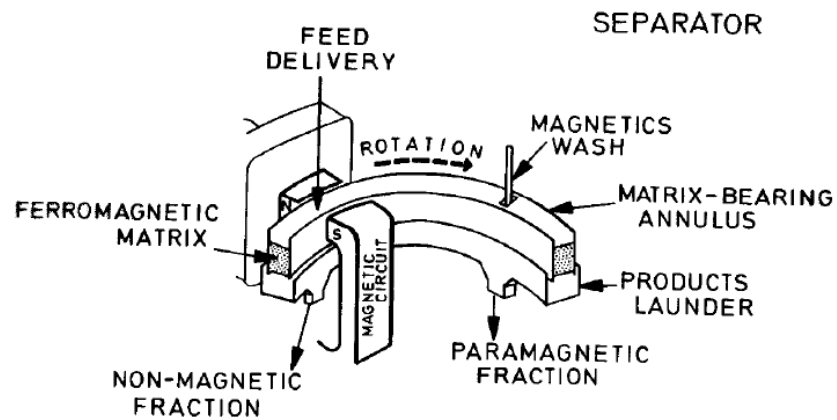


Captage par un réseau aimanté



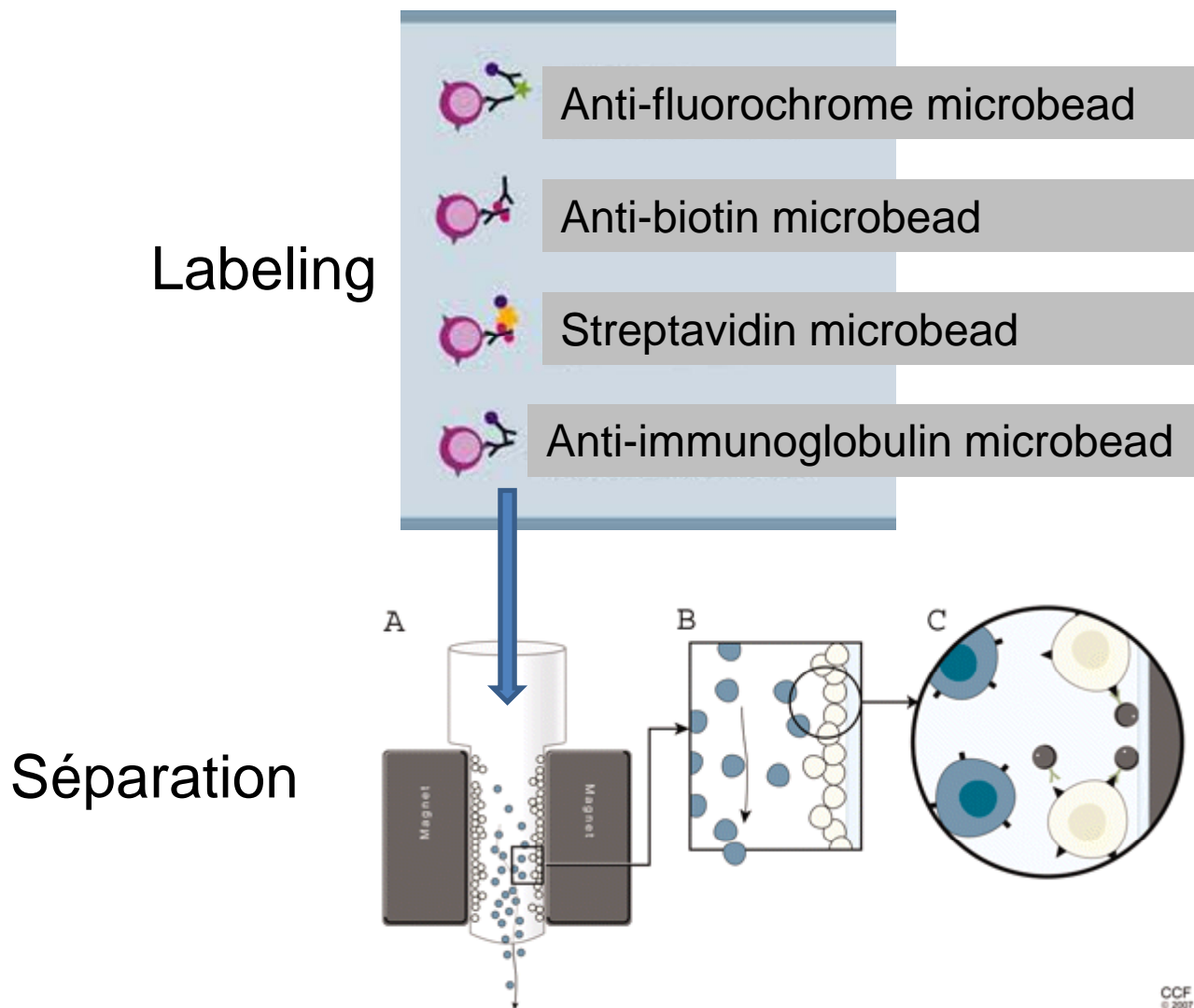
# Applications: enrichissement des minéraux

(fer, manganèse, plomb, vanadium, ...)



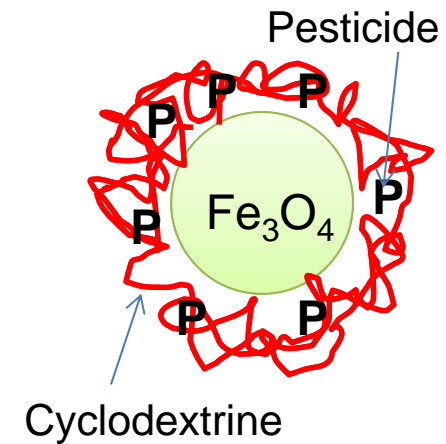
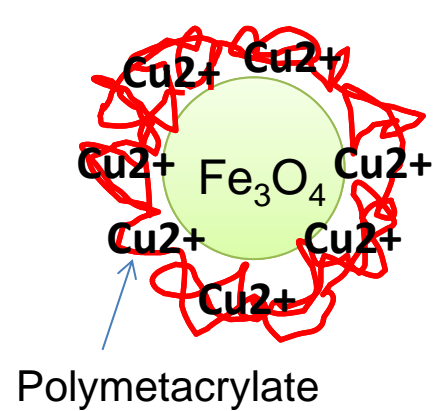
*Svoboda « Magnetic techniques for the treatment of materials » Kluwer 2004*

## Applications: séparation des cellules

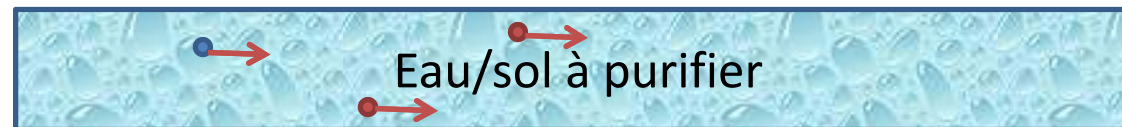


# Applications: purification de l'eau et des sols

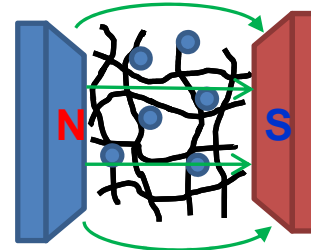
fonctionnalisation



Adsorption  
du polluant



Séparation

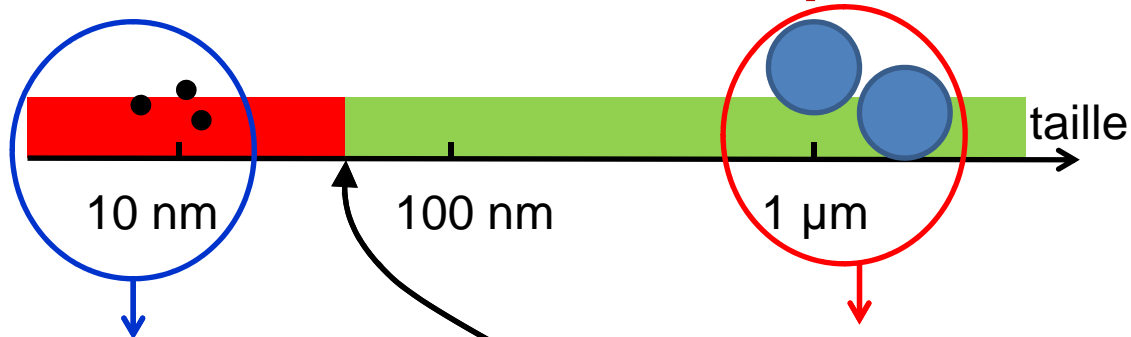


purification des sols des métaux lourds + HAP avec particules non-magnétiques

Projet TIMBRE – Allemagne

Projet Silphes (AMI) - France

## Effet de taille des particules



- difficile / impossible à séparer
- grande surface spécifique

- facile à séparer
- petite surface spécifique

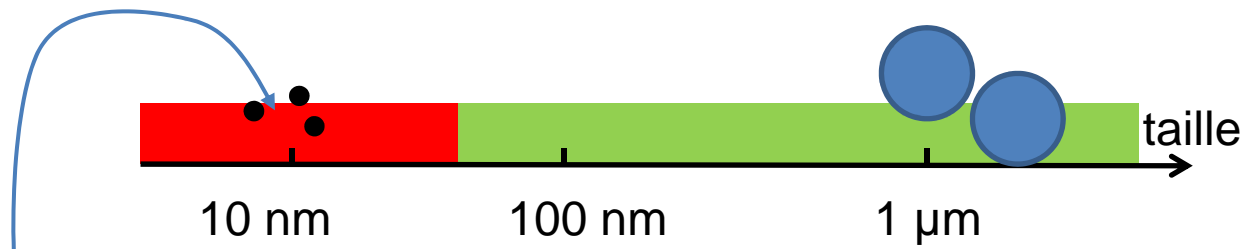
Jusqu'où peut-on descendre en taille ?



- Particules faiblement magnétiques: à 1T  $d > 200$  nm
  - Particules fortement magnétiques: à 1T  $d > 50$  nm
- imprécis

**Critères plus précis**

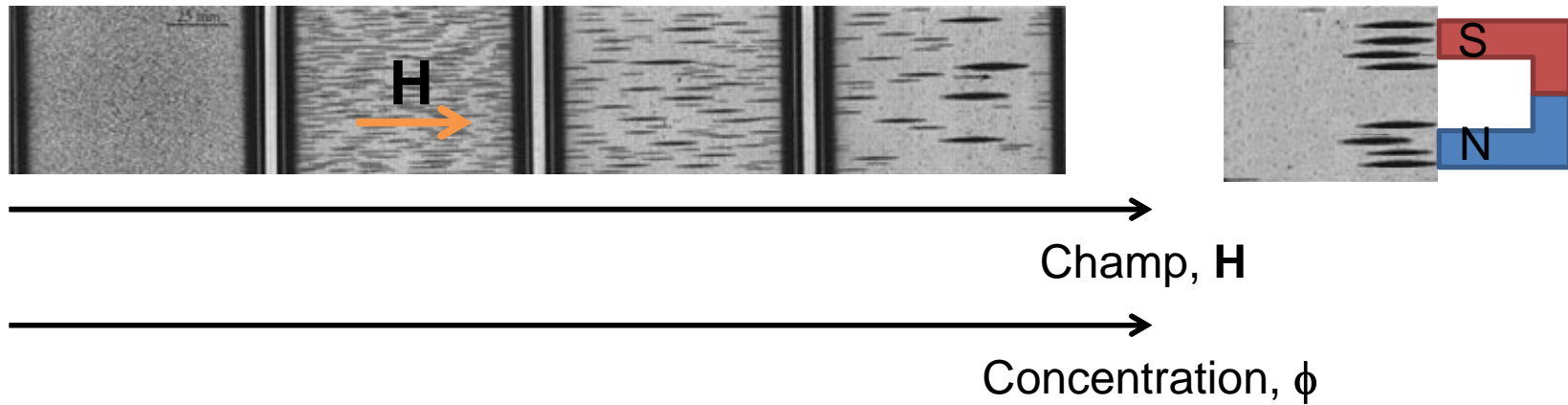


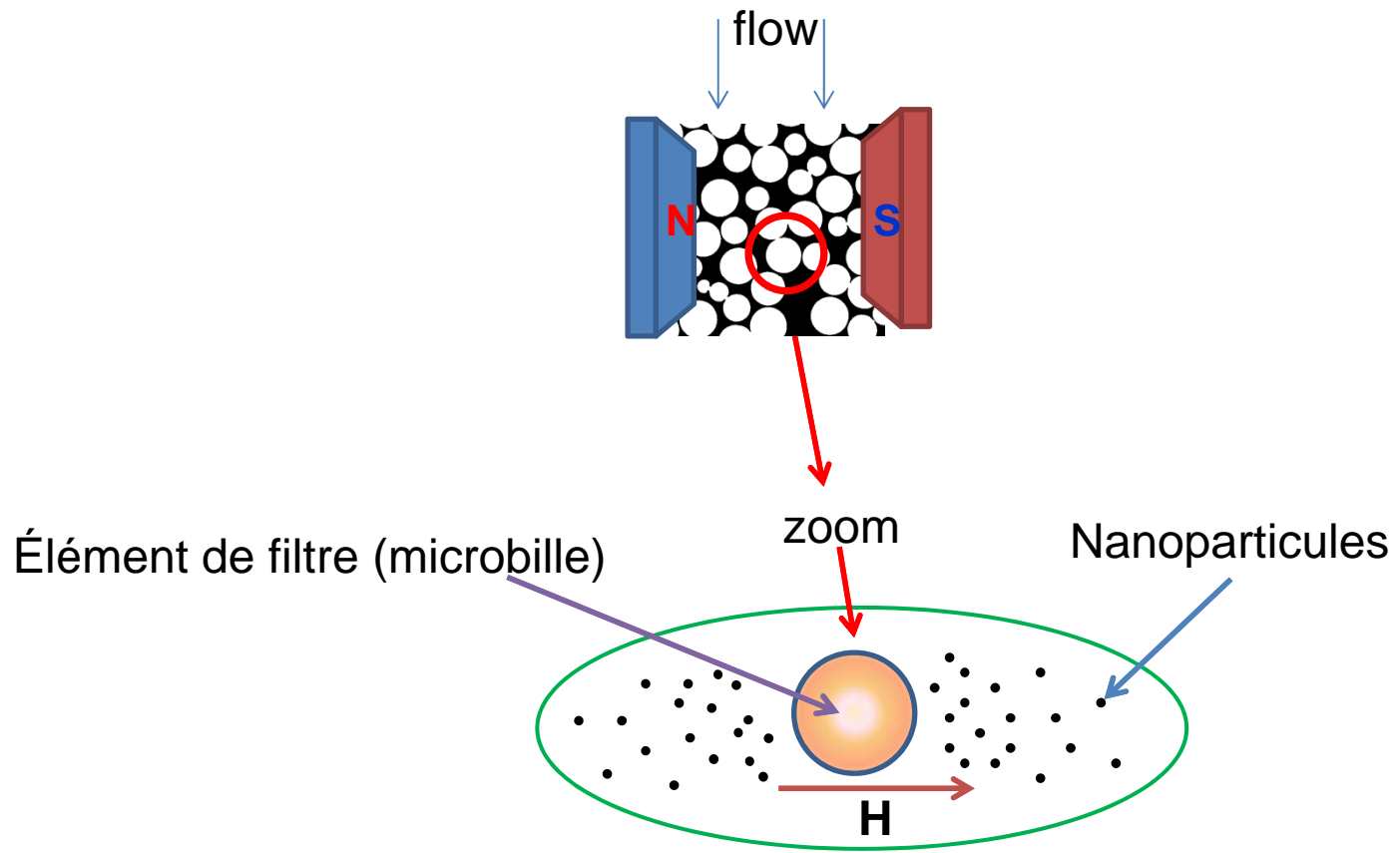


Y a-t-il un mécanisme permettant le captage de particules de petite taille



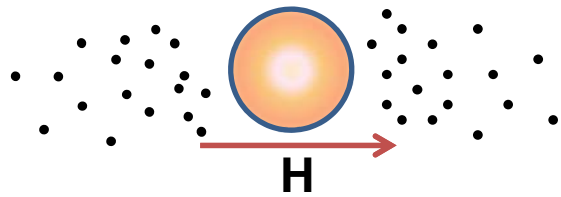
Interactions magnétiques entre nanoparticules → **séparation de phase**







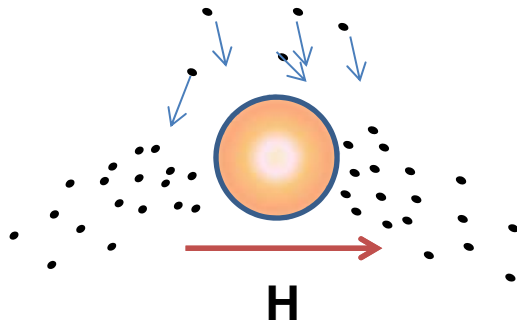
## Plan de l'exposé



**Captage de nanoparticules par une microsphère en absence de l'écoulement**

visualisation

théorie

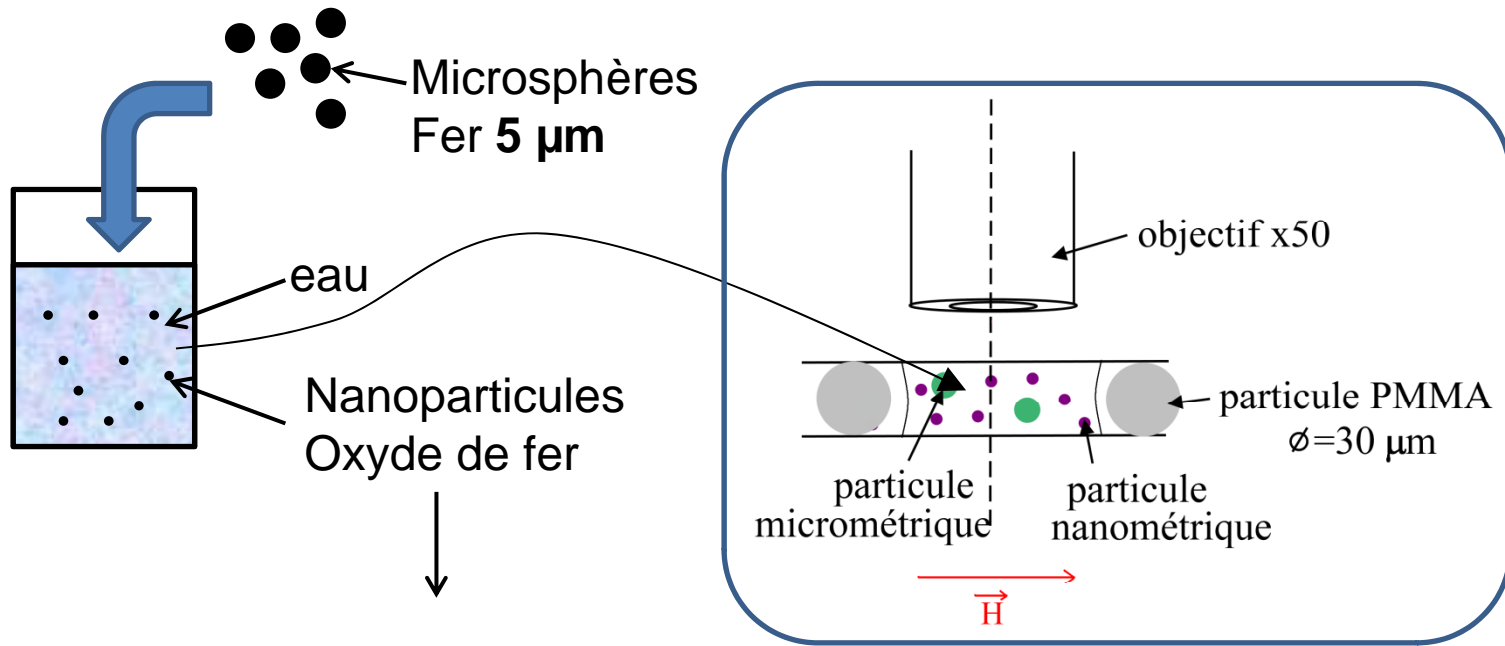


**Captage de nanoparticules par une microsphère en écoulement**

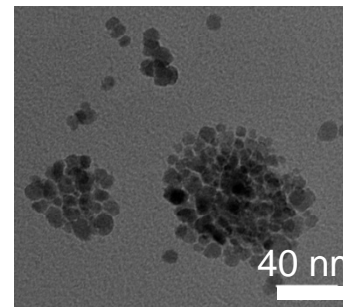
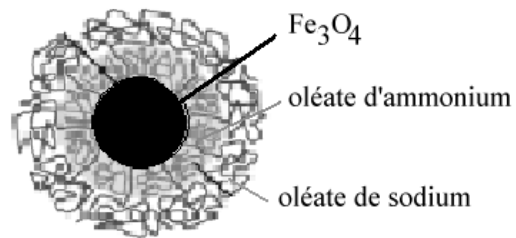
champ longitudinal

champ transversal

# Visualisation: statique

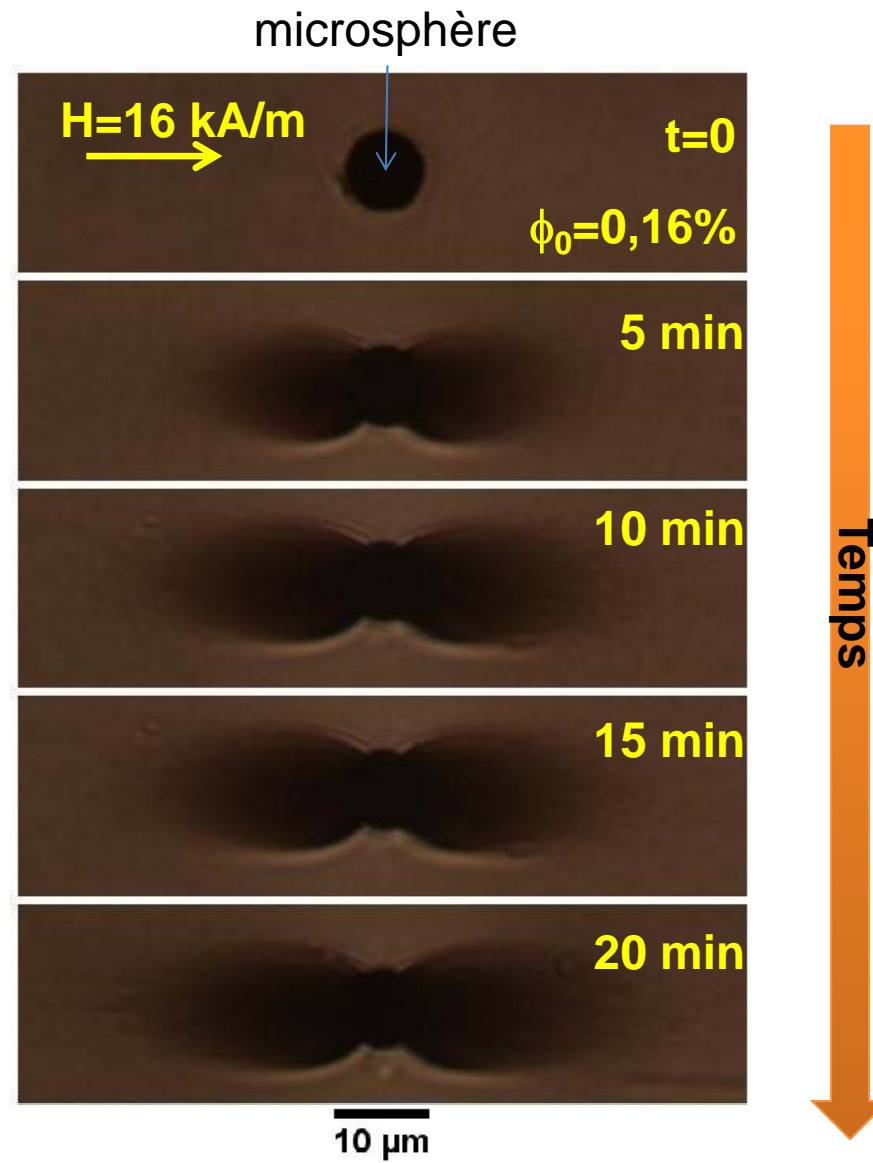


## Stabilisation stérique

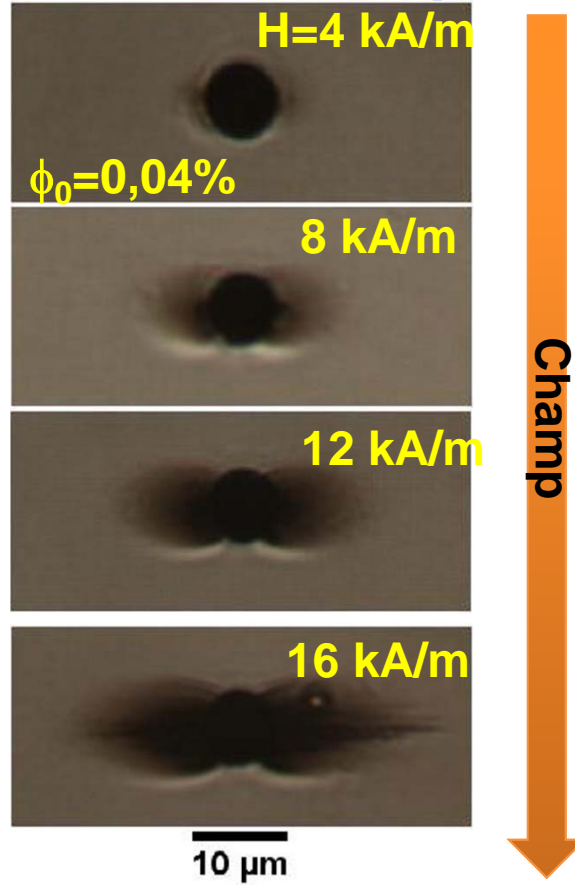


Nanoclusters 60 nm

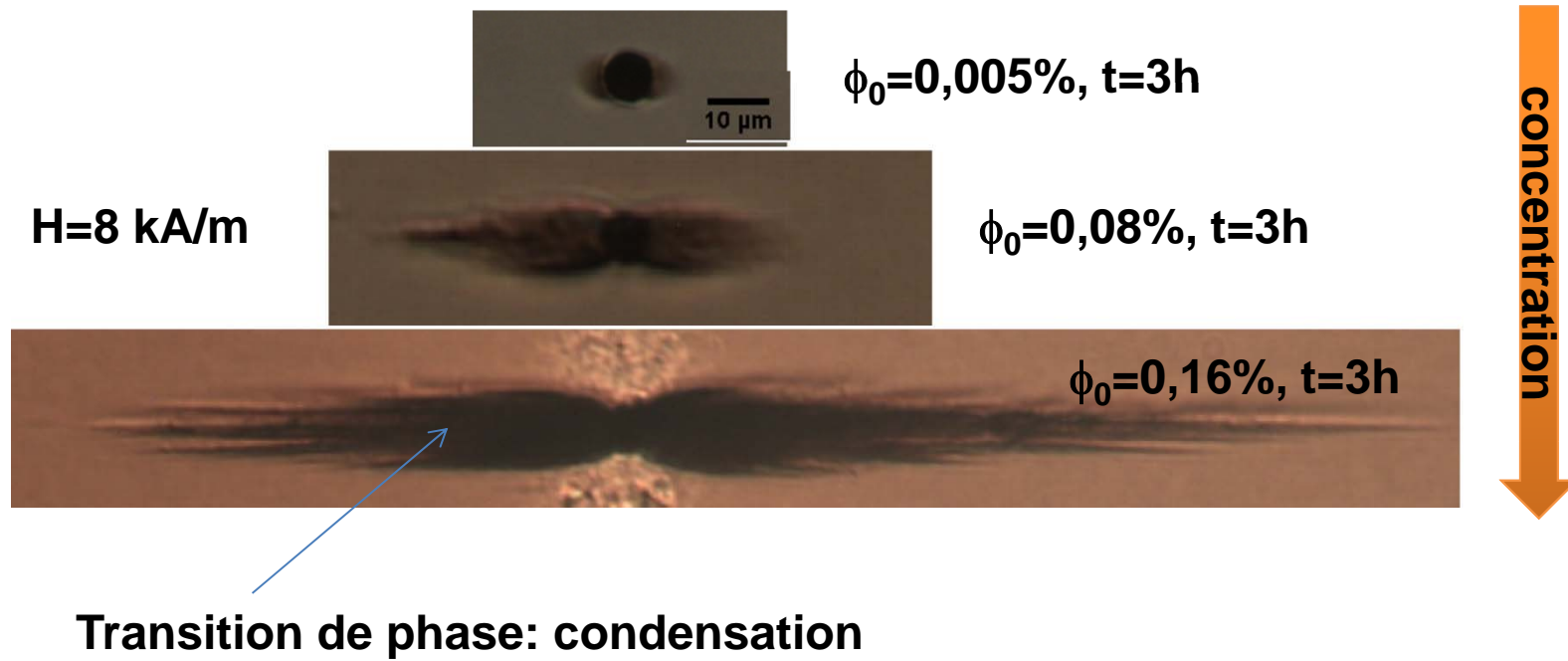
# Résultats: visualisation par microscopie



## Effet du champ

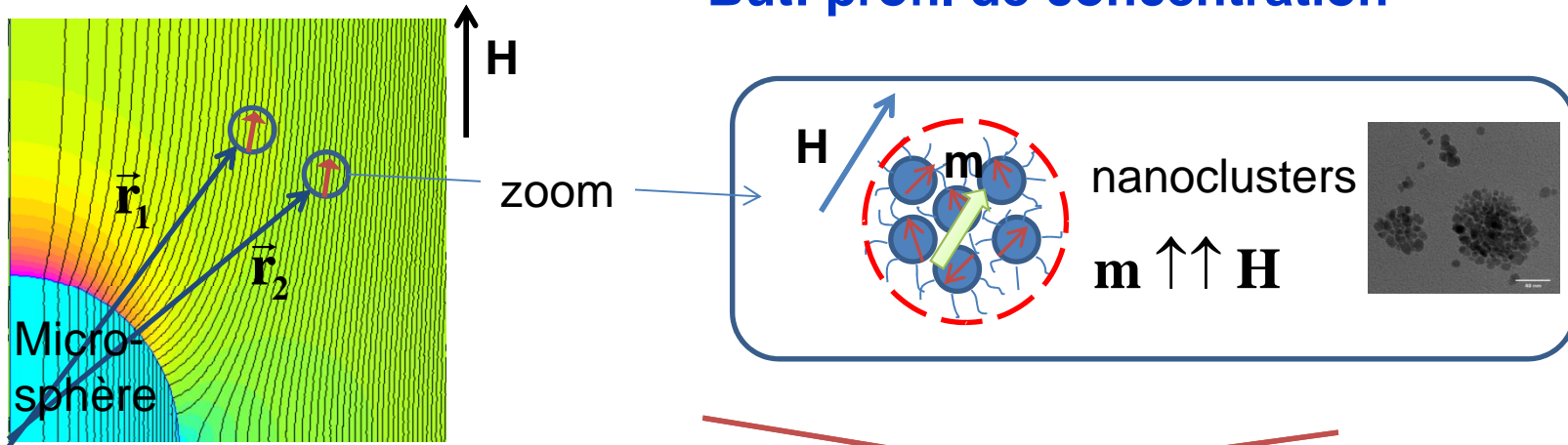


## Effet de la concentration



# Théorie: nanoclusters en interaction

But: profil de concentration



~~Distribution de Boltzmann~~

Equation d'état pour l'ensemble de nanoclusters

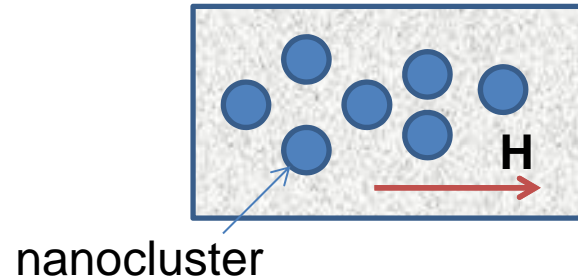


Transition de phase



Profil de concentration

## L'équation d'état de l'ensemble de nanoclusters



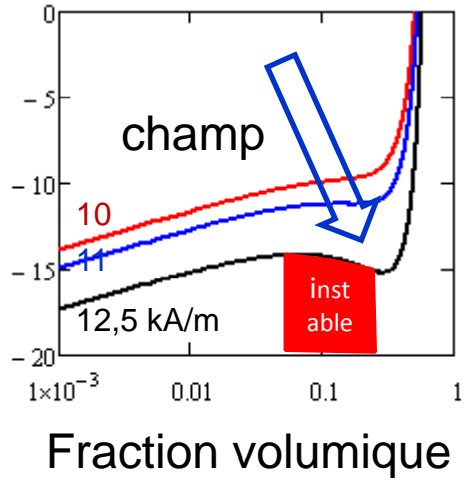
$$F = \underbrace{\left[ NkT \ln \left( \frac{N\Lambda^3}{V} \right) - NkT \right]}_{\text{Gaz parfait de nanoclusters}} + \underbrace{NkT\Phi \frac{4-3\Phi}{(1-\Phi)^2}}_{\text{Interactions « volume exclu »}} - \underbrace{\mu_0 \int_0^{\mathbf{H}} \mathbf{m}_{susp} \cdot d\mathbf{H}}_{\text{Interactions magnétiques}}$$

$\mathbf{m}_{susp} = f(\phi, \mathbf{H}) \rightarrow$  théorie de champ moyen (Maxwell-Garnett, Looyenga, ...)

**Potentiel chimique**

$$\mu = \left( \frac{\partial F}{\partial N} \right)_{T, V, \mathbf{H}} = f(\phi, \mathbf{H})$$

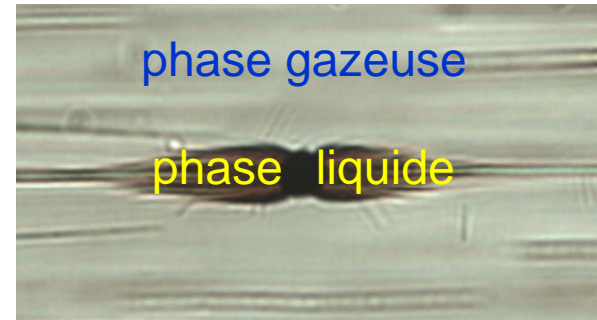
Potentiel chimique



**Transition de phase**

binodales

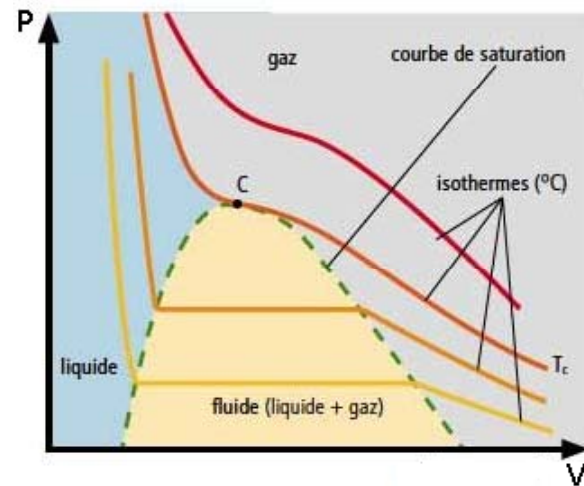
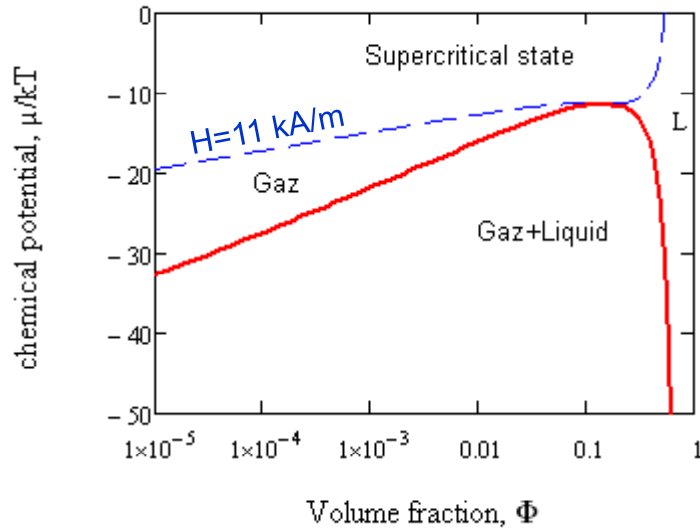
$$\begin{cases} \mu_{gas} = \mu_{liquid} \\ p_{gas} = p_{liquid} \end{cases}$$



avec  $p = -\left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_{T,N,\vec{H}}$

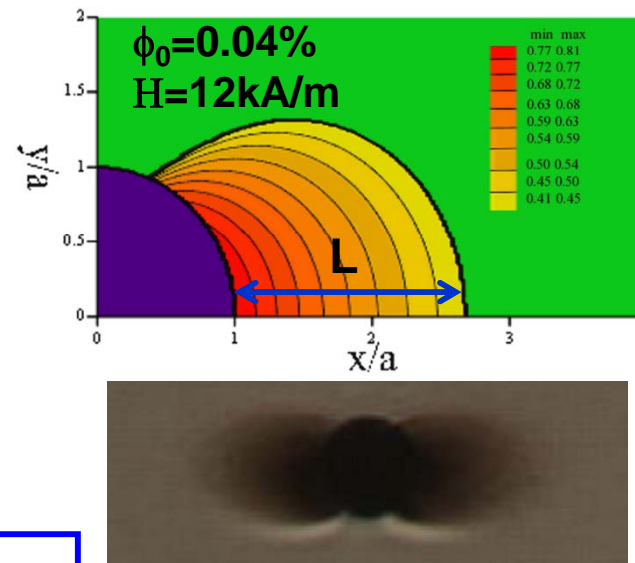
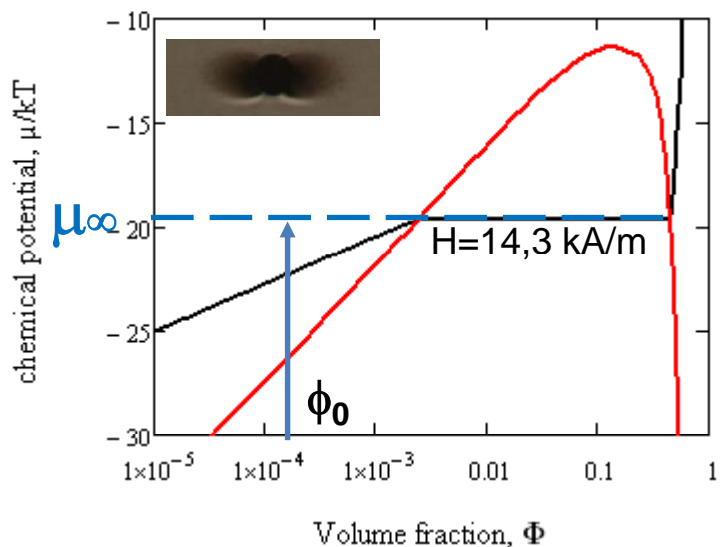
**Diagrammes de phase**

Analogie: gaz de van der Waals

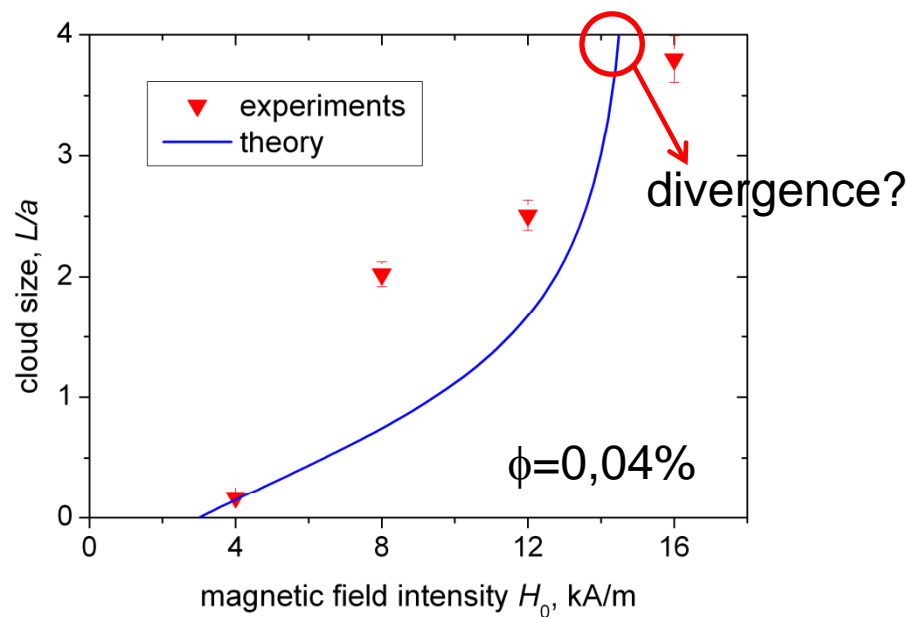
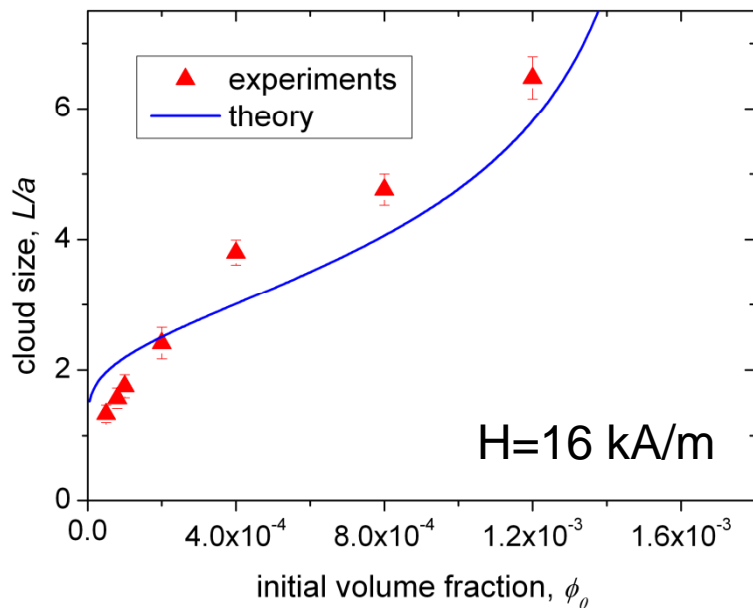




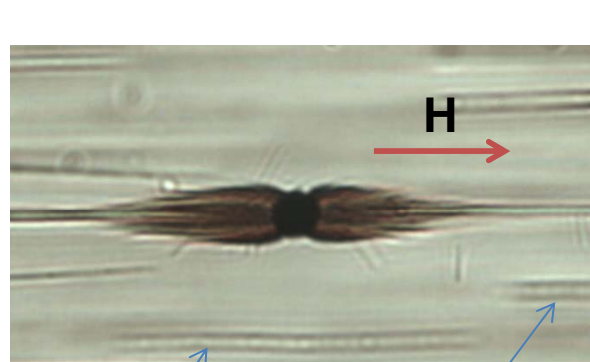
## Profil de concentration: faible $\phi_0$ / faible champ



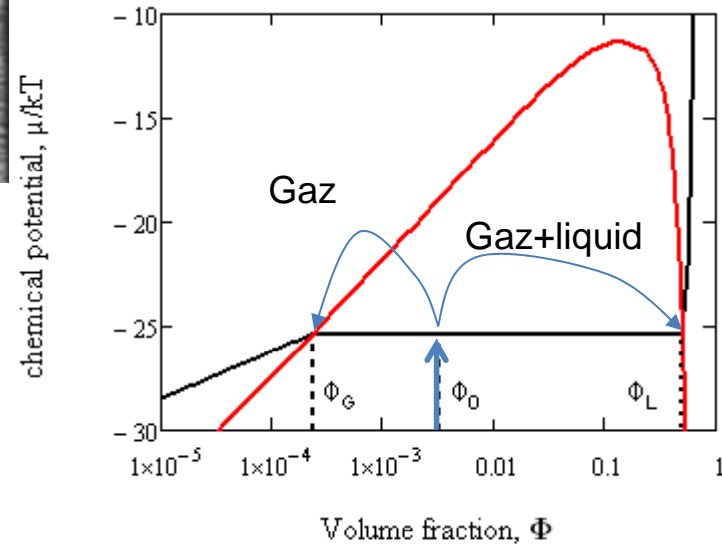
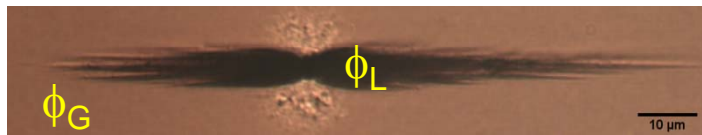
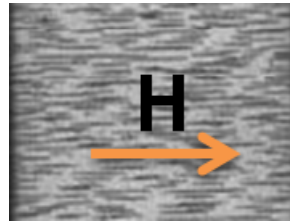
$\mu = \text{homogène} = \mu_\infty$



## Profil de concentration: forte $\phi_0$ / fort champ



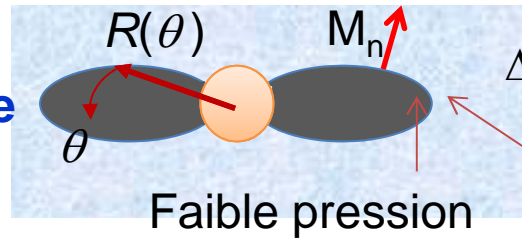
chaînes de nanoclusters



Comment expliquer la forme allongée du nuage ?

$$U = \int \left( -\frac{1}{2} \mathbf{M} \cdot \mathbf{H} \right) dV \rightarrow \min$$

## Saut de pression magnétique



$$\Delta p = -\frac{1}{2} \mu_0 \left[ (M_{liquid})_n^2 - (M_{gas})_n^2 \right]$$

Forte pression

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_{cloud}(\phi_L, H) = \mu_\infty \\ p_{cloud}(\phi_L, H) - \underbrace{p_{gas}(\phi_G, H)}_{\approx 0} = -\frac{1}{2} \mu_0 M_n^2 \\ \nabla p_{cloud} = \mu_0 M \nabla H \\ \phi_0 V = \int_{gas} \phi dV + \int_{cloud} \phi dV \approx \phi_G V_G + \phi_L V_L \\ M_n = \mathbf{M} \cdot \mathbf{n} = \chi \frac{H_r - H_\theta R' / R}{\sqrt{1 + (R' / R)^2}}; \quad R' \equiv \frac{dR}{d\theta} \end{array} \right.$$

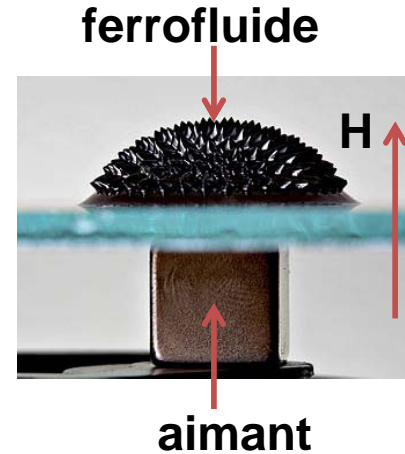
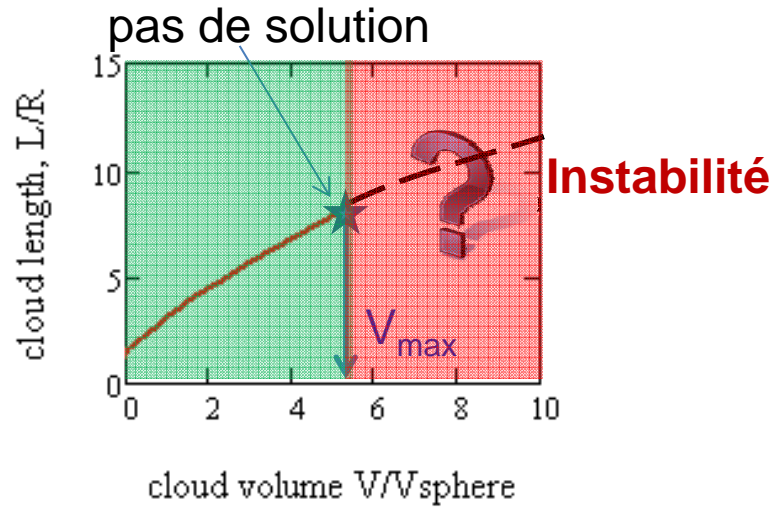
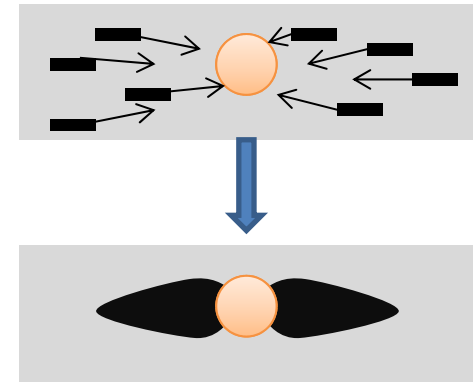
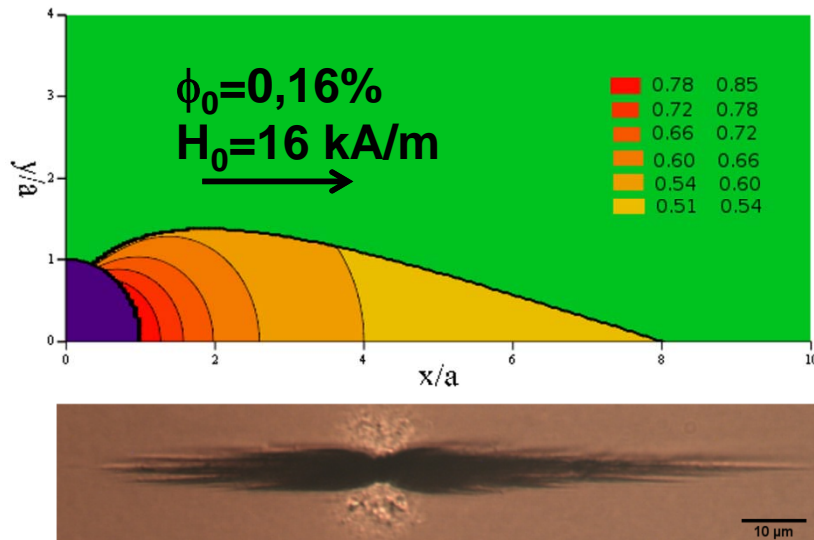
**Equilibre thermo**

**Equilibre méca**

**Distribution de pression**

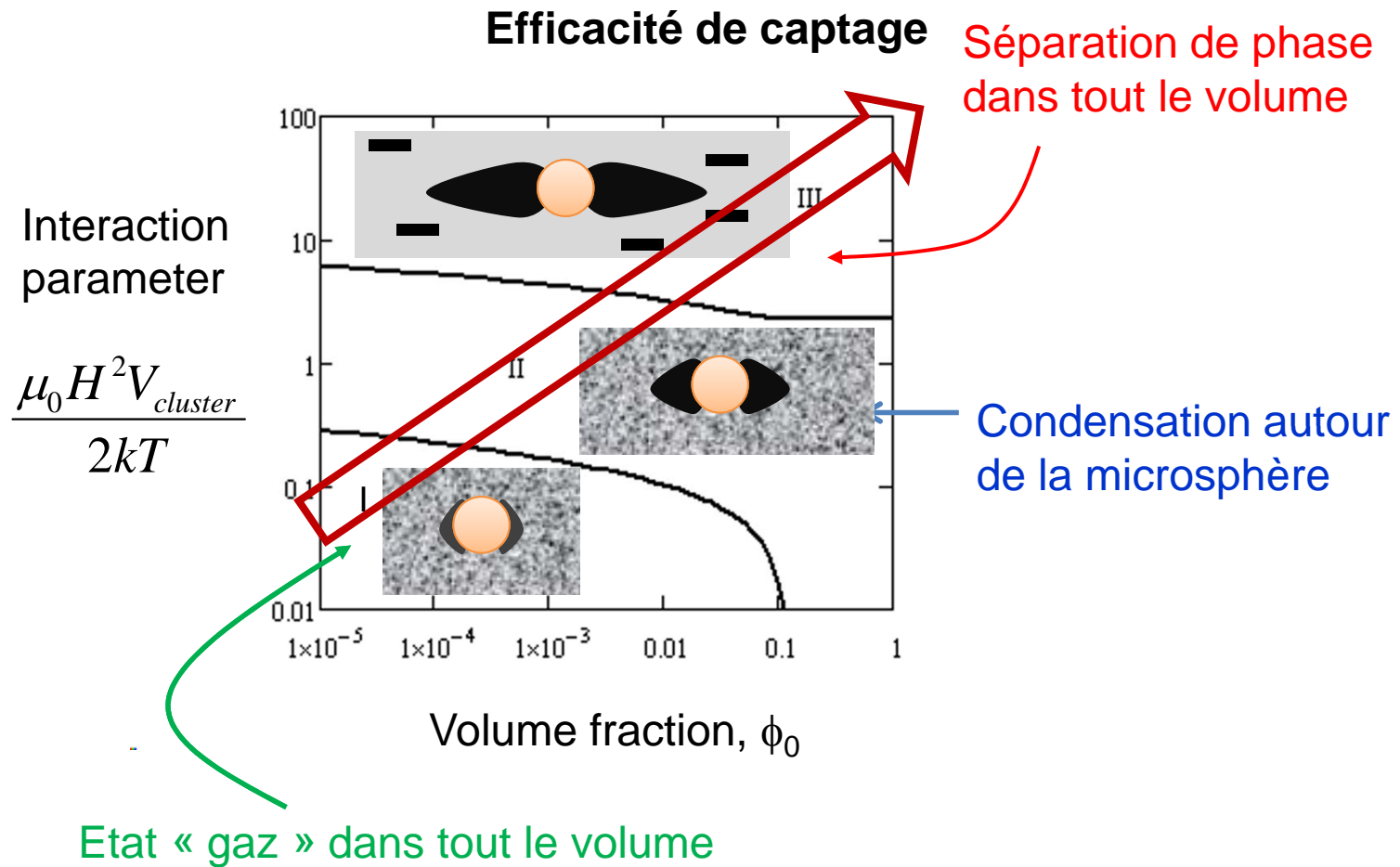
**Conservation de  
quantité de particules**

## Profil de concentration: forte $\phi_0$ / fort champ

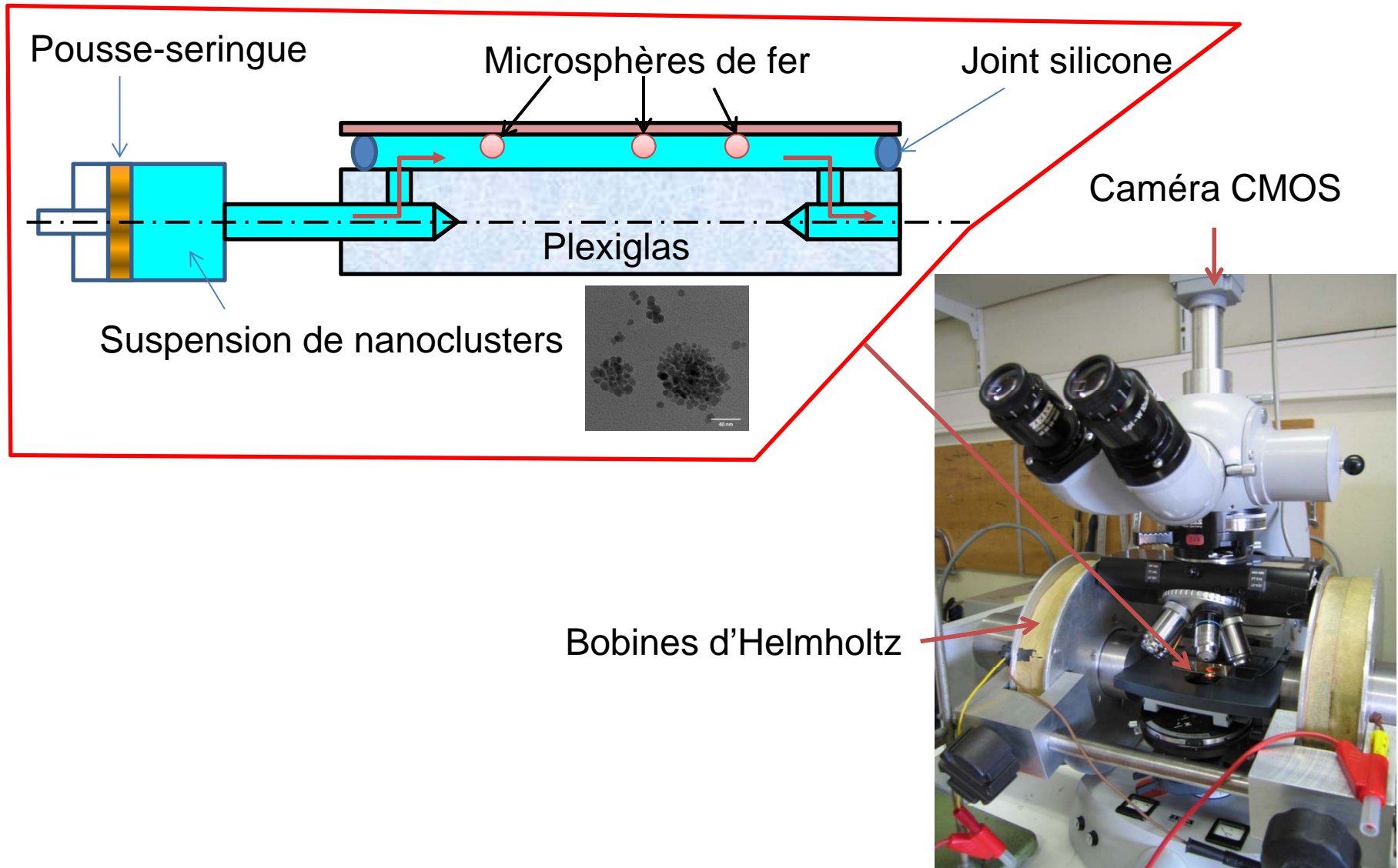


**À éclaircir par des simulations numériques**

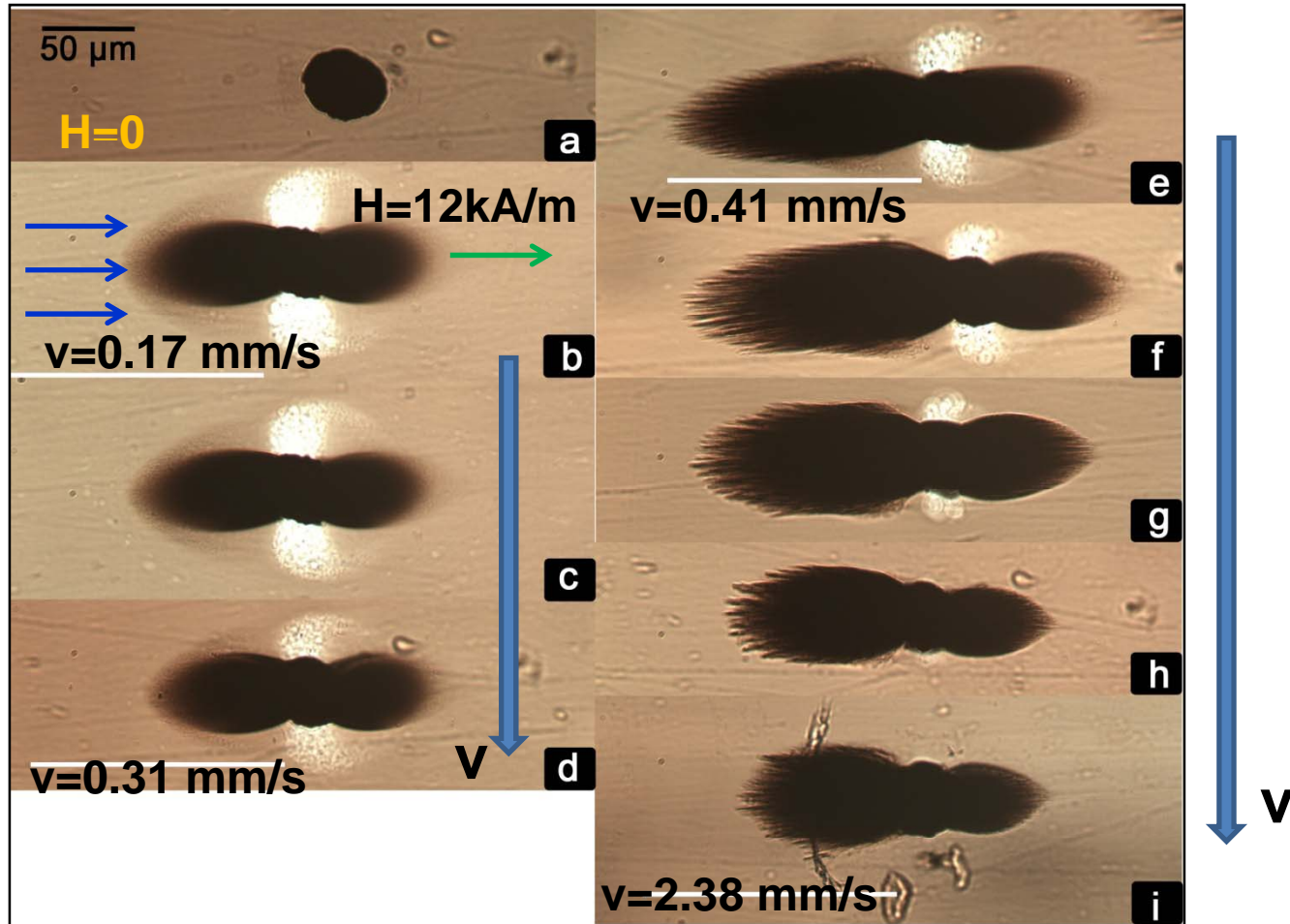
### 3 régimes d'accumulation de nanoparticules/nanoclusters



# Visualisation: écoulement

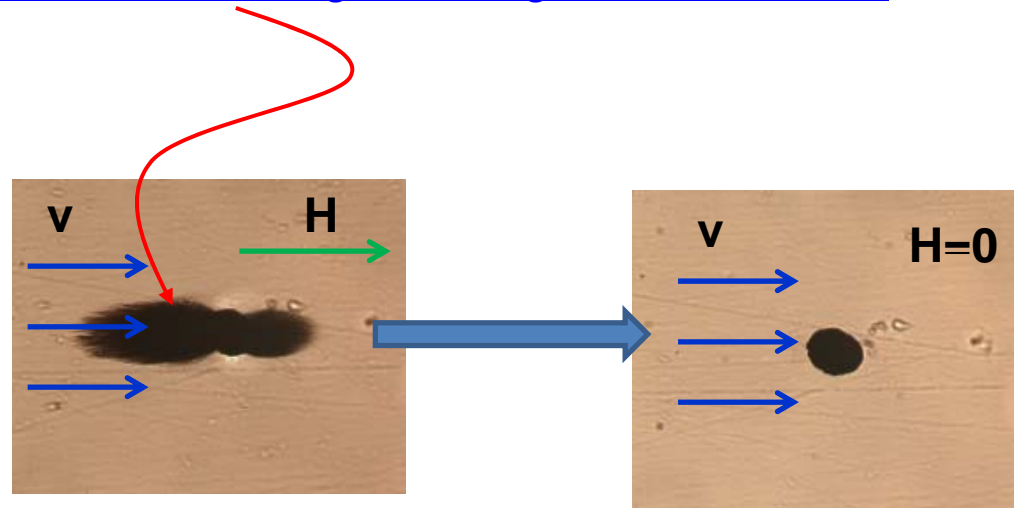


Champ  $\uparrow\uparrow$  vitesse



Observations 3h après le début de l'expérience

La « vie » des nuages en régime stationnaire

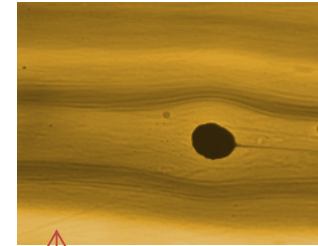


Cinétique de destruction de nuage

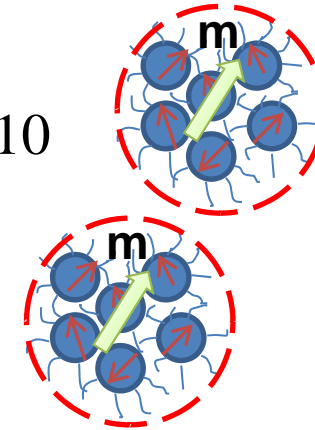


# Analyse de résultats: nombres sans dimension

**Nombre de Reynolds:**  $Re_{microsphère} = \frac{v \cdot d_{microsphère}}{\mathcal{G}} < 0,1 \Rightarrow$  **Écoulement laminaire**



**Paramètre d'interaction:**  $\lambda = \frac{U_{cluster-cluster}}{kT} \sim \frac{\mu_0 H^2 V_{cluster}}{2kT} \sim 1 \div 10$

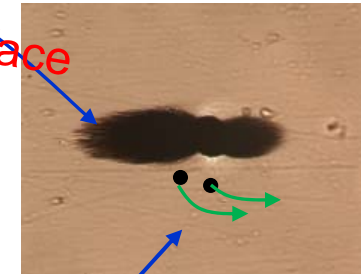


*Interactions magnétiques  $\approx$  Mouvement brownien*

**Nombres de Mason**

$Ma_{microsphère} = \frac{\sigma_{hydro}}{\sigma_{magn}} = \frac{\eta \cdot v / d_{micro}}{\mu_0 H^2} \sim 10^{-3} \div 10^{-4}$

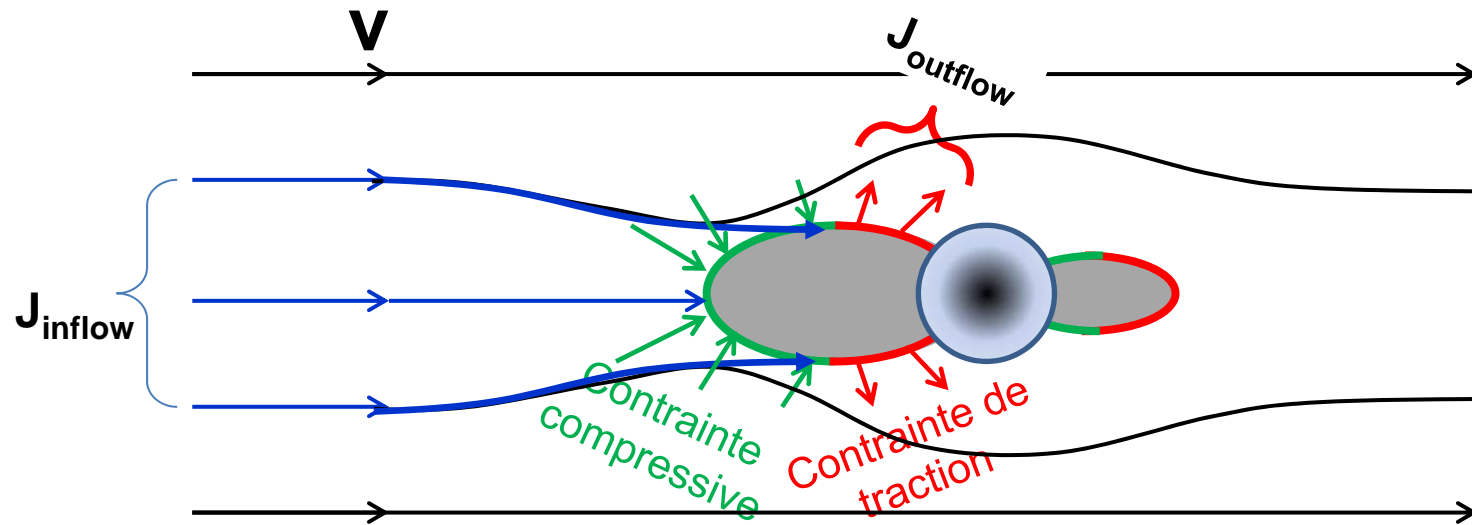
*Contraintes sur la surface*



$Ma_{nanocluster} = \frac{F_{érosion}}{F_{cohésion}} = \frac{\eta \cdot v / d_{nano}}{\mu_0 H^2} \sim 0,1 \div 1$

*Erosion des nanoclusters*

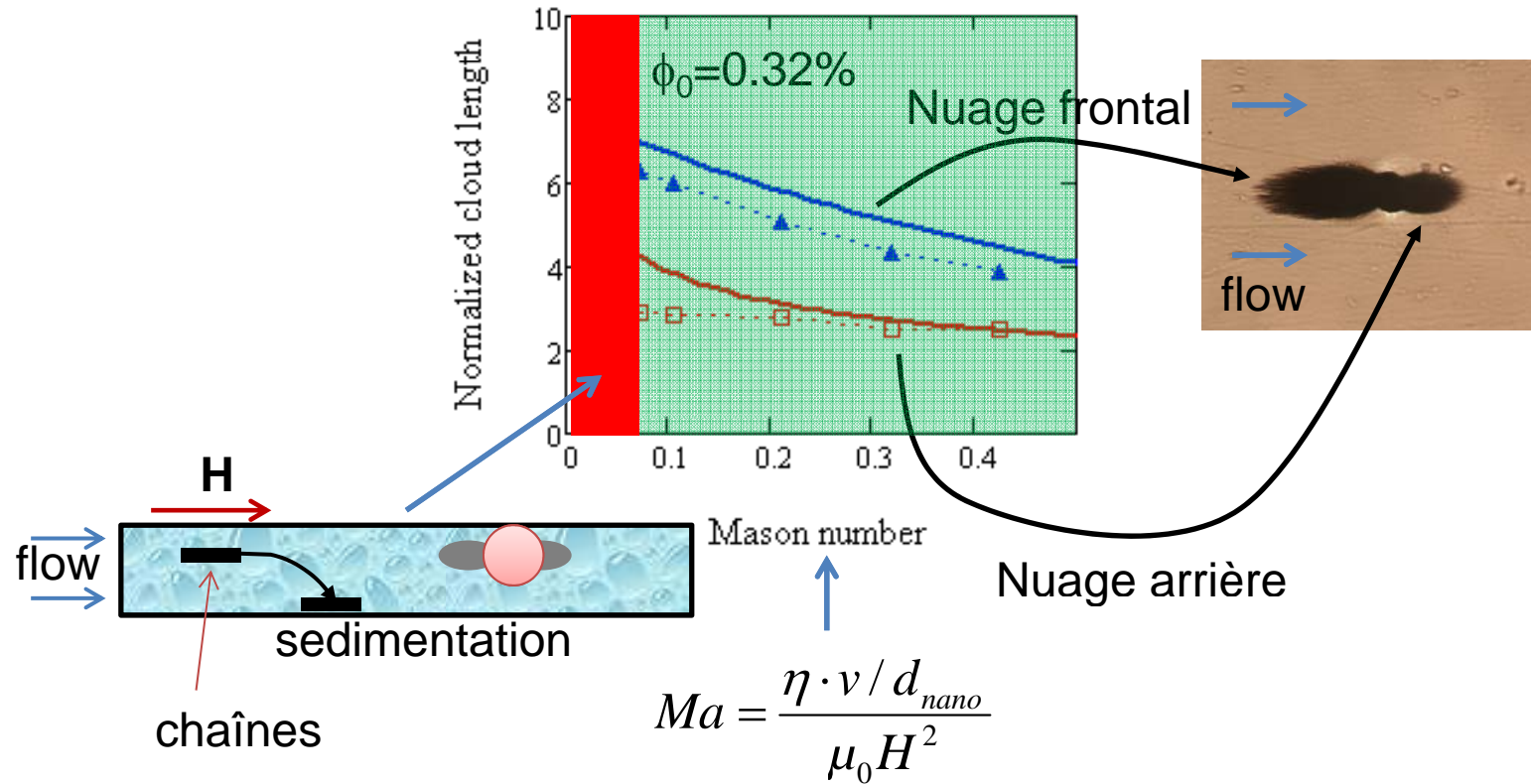
# Estimation de la taille de nuage en écoulement



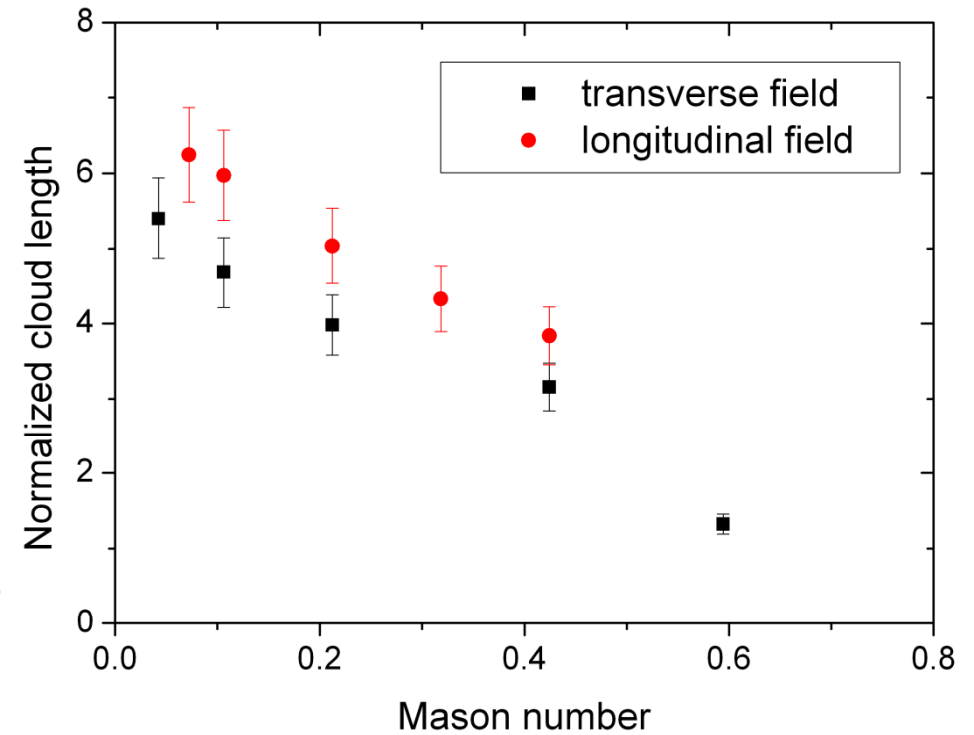
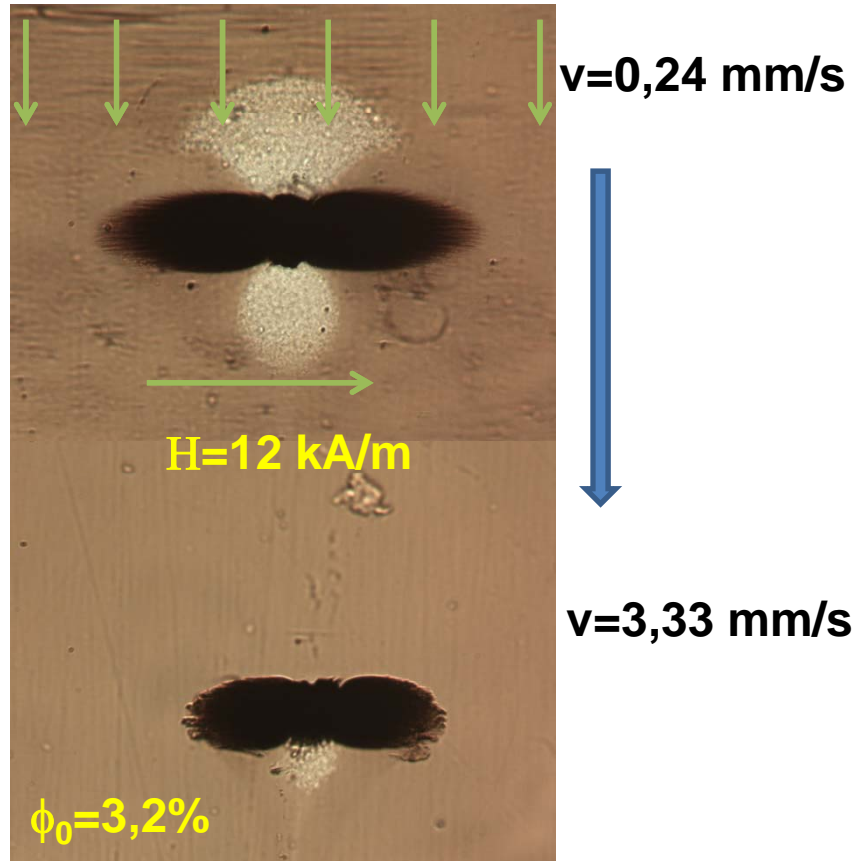
## Hypothèses principales:

- $Ma_{microsphère}$  faible  $\rightarrow$  pas d'influence de l'écoulement sur le bilan de contrainte sur la surface de nuage;
- Taille de nuage  $\leftarrow$  érosion de nanoclusters du nuage

# Résultats préliminaires: nuages sous écoulement

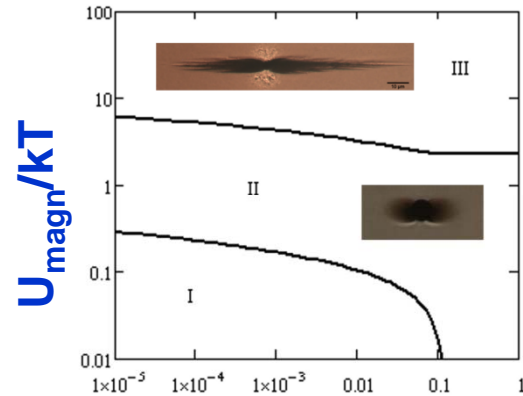


# Champ $\perp$ vitesse



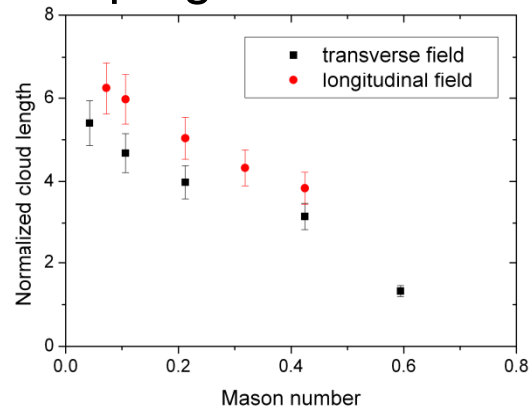
# Conclusions

- Le captage de nanoparticules magnétiques peut devenir efficace si l'interaction entre particules est suffisamment forte pour induire la condensation



## Fraction volumique

- La capacité de captage diminue avec la vitesse; les nuages ont la taille comparable en champs longitudinal et transversal. Nombre de  $Ma = F_{\text{hydro}}/F_{\text{magn}}$  régit le captage en écoulement.



# Perspectives

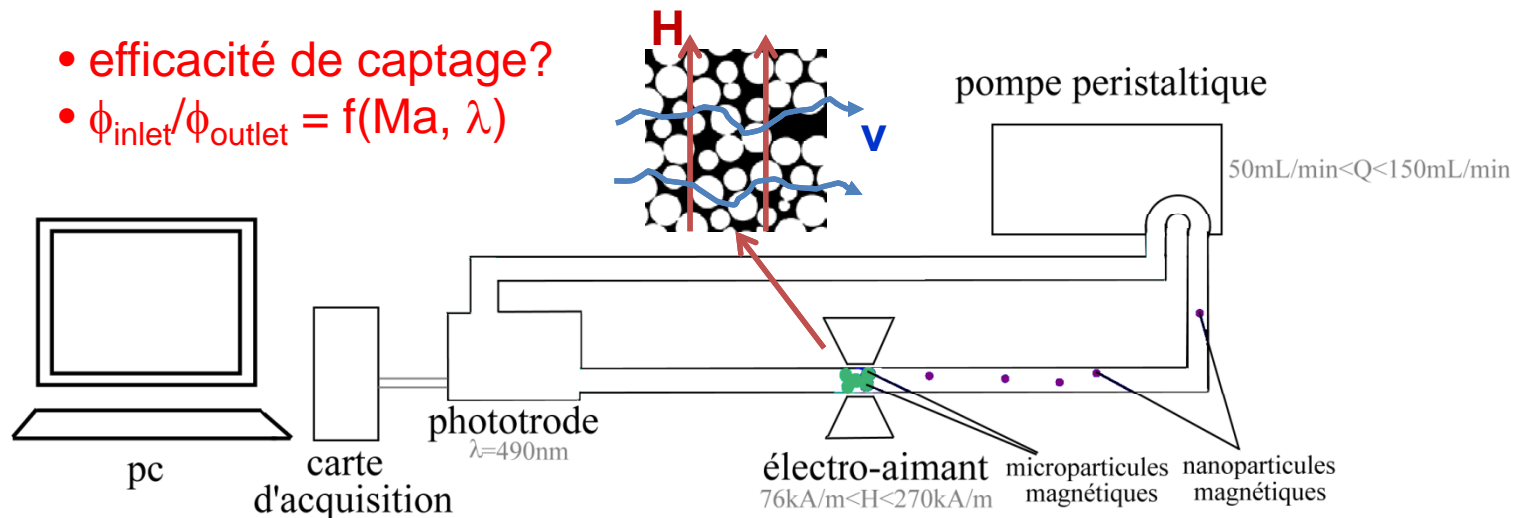
- Simulations numériques de l'accumulation de nanoparticules en écoulement

- éq. de diffusion-convection avec  $j_{diff} \sim -\nabla\mu$
- éq. de mouvement;
- éq. de la surface libre:  $\sigma_{nn1} = \sigma_{nn2}$
- éqs. de Maxwell

dynamique brownienne

- Expériences/théorie sur la filtration des nanoparticules

- efficacité de captage?
- $\phi_{inlet}/\phi_{outlet} = f(Ma, \lambda)$



- Captage des ions de métaux et des pesticides par des nanoparticules fonctionnalisées

Merci pour votre attention