

Croissance de super-réseaux de boîtes quantiques à base de SiGe pour des applications TE

David HAUSER
doctorant 3^{ème} année EEATS

Directeur de thèse : Laurent MONTÈS (IMEP-LAHC)

Co-encadrant : Marc PLISSONNIER (Liten)

Collaborateurs : Guillaume SAVELLI, Julia SIMON,
Natalio MINGO (Liten)



IMEP-LAHC

Grenoble



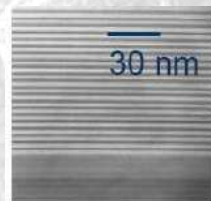
liten

Les super-réseaux de boîtes quantiques à base de SiGe

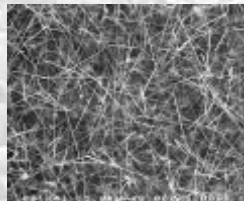
- ❖ Pourquoi ?
- ❖ Comment ?
- ❖ Quels résultats ?

Contexte de l'étude

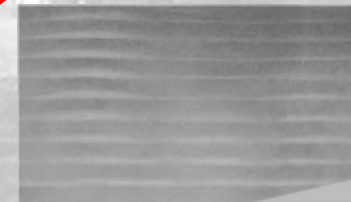
- **Domaines d'application** : capteurs, réfrigération locale, microgénération thermoélectrique
- Les **avantages** du SiGe :
 - non toxicité
 - compatibilité avec les techniques de la micro-électronique
- **Problème** : $ZT(\text{SiGe}) \sim 0,1$ à 300 K.
- La **nanosstructuration**, une voie possible pour augmenter le ZT :
 - augmentation du facteur de puissance, σS^2
 - diminution de la conductivité thermique, λ



Super-réseau



Nanofils

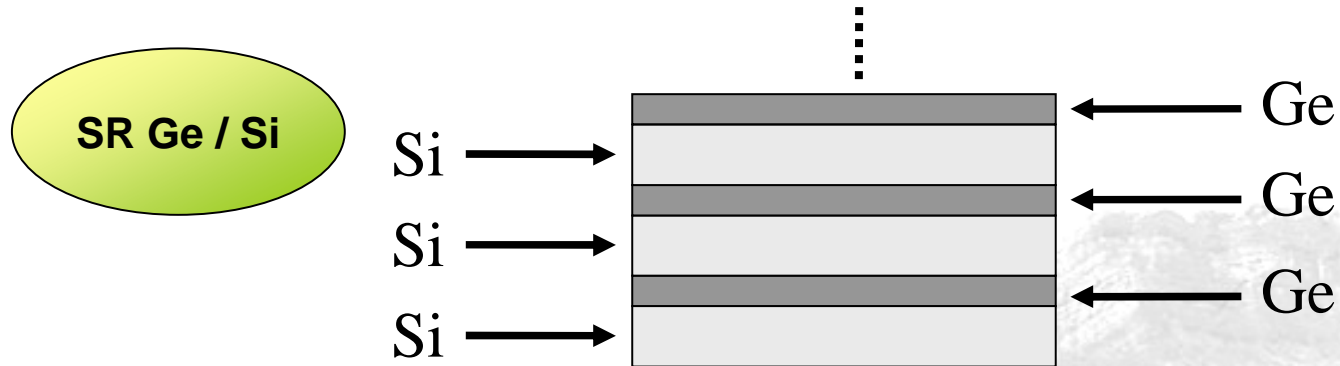


Super-réseau de boîtes quantiques

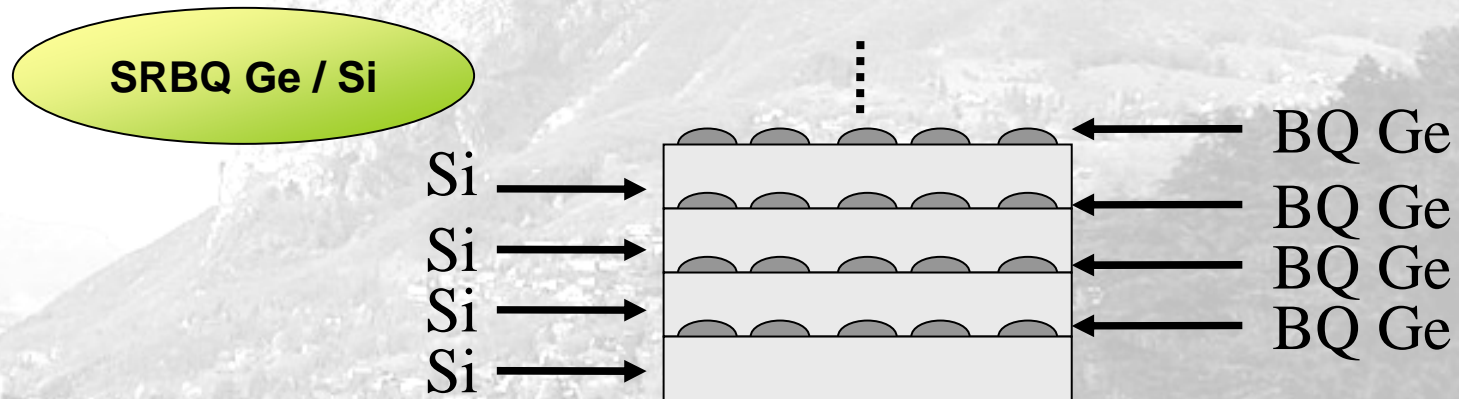
BQ Ge / SiGe

Définition d'un super-réseau de boîtes quantiques

Super-réseau (SR) : structure périodique en couche mince constituée de deux matériaux (ou plus).

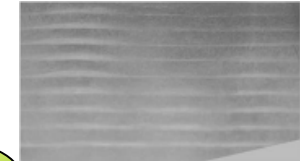


Super-réseau de boîtes quantiques (SRBQ) : super-réseau dont une des couches est remplacée par des boîtes quantiques.



Le choix des super-réseaux de boîtes quantiques de Ge dans SiGe

- Effet des BQ plus important dans le SiGe que dans le Si



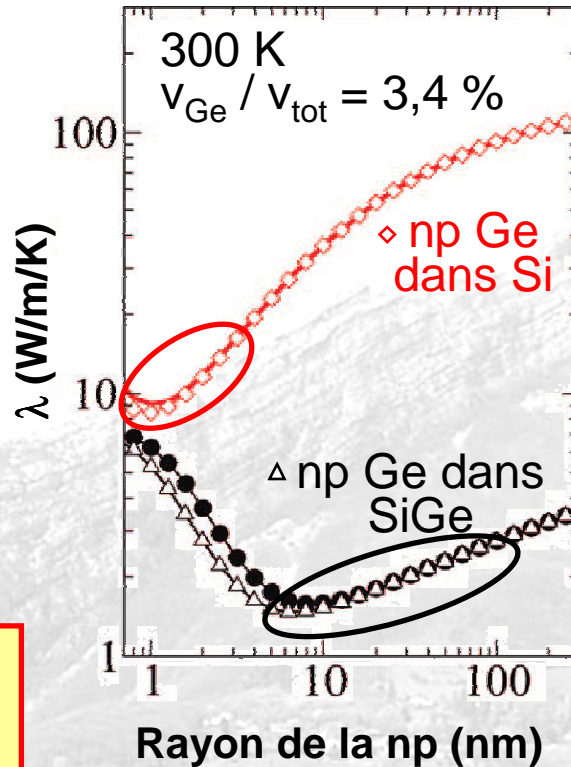
Si

Transport thermique régi par les phonons de faibles longueurs d'onde

$$L^{-1} = L_{Si}^{-1} + L_{np}^{-1}$$

(phonons) ↑
nanoparticule

Nanoparticules efficaces (pour des tailles très réduites)



SiGe

Transport thermique régi aussi par les phonons de grandes longueurs d'onde

$$L^{-1} = L_{SiGe}^{-1} + L_{np}^{-1}$$

(phonons) ↑
désordre Si-Ge

Nanoparticules efficaces (pour une large gamme de tailles)

- *A priori*, pas d'altération du facteur de puissance, σS^2 :

$$L_{SiGe} < 10 \text{ nm} < d_{np-np}$$

(électrons)

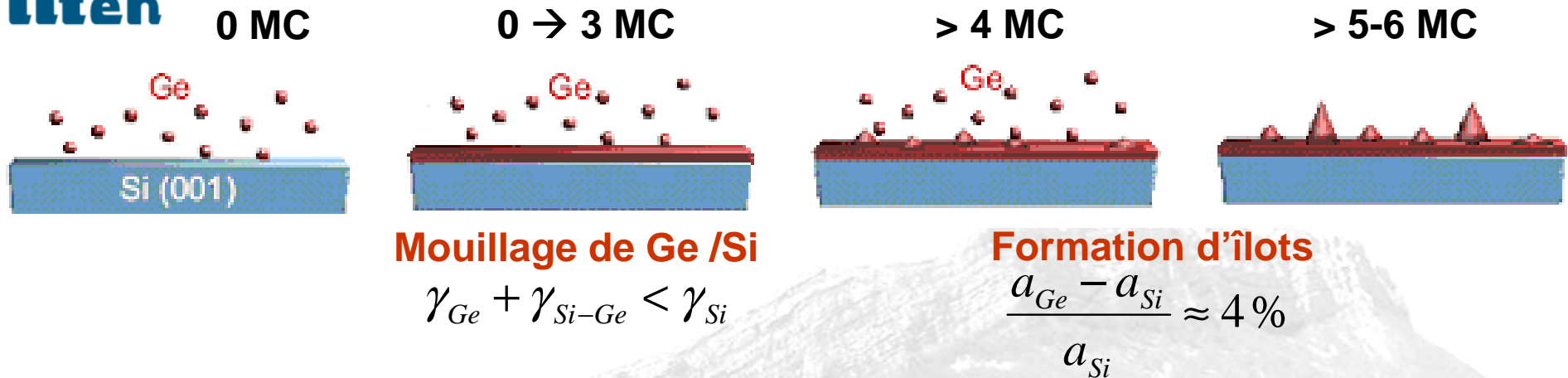
Mingo *et al.* *Nano Letters* **9**, 711-715 (2009).

Les super-réseaux de boîtes quantiques à base de SiGe

- ❖ Pourquoi ?
- ❖ Comment ?
- ❖ Quels résultats ?

Dépôt des boîtes quantiques de Ge

➤ Croissance auto-organisée de Ge / Si (001) : Stranski – Krastanow



➤ Techniques de dépôt :

MBE

CVD



Très bon contrôle

Contrôle difficile



Très lent
Dopage *ex situ*

Rapide
Dopage *in situ* possible

Conditions usuelles :

- Pression de travail : 10 torrs
- Température : 750°C
- Gaz utilisés :
 - Gaz porteur : H_2
 - Précurseurs : SiH_4 , GeH_4 , B_2H_6 , PH_3
 - Nettoyage : HCl

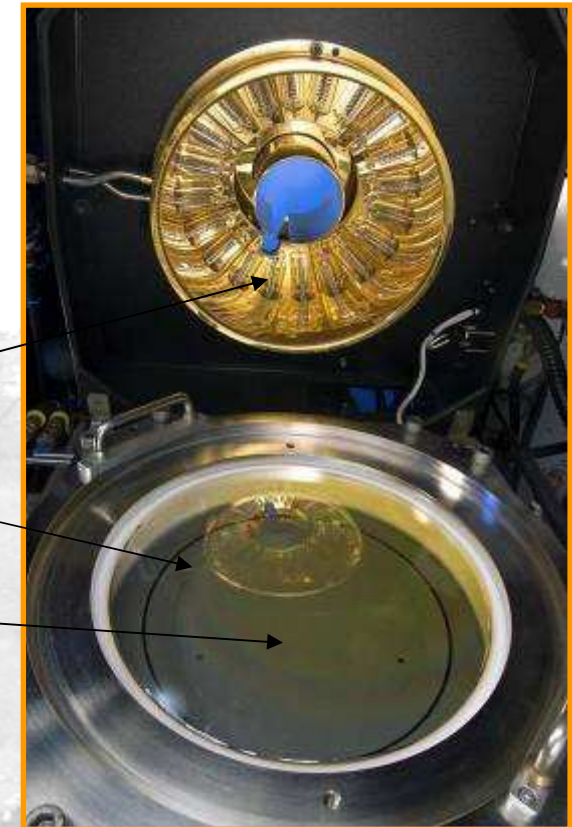
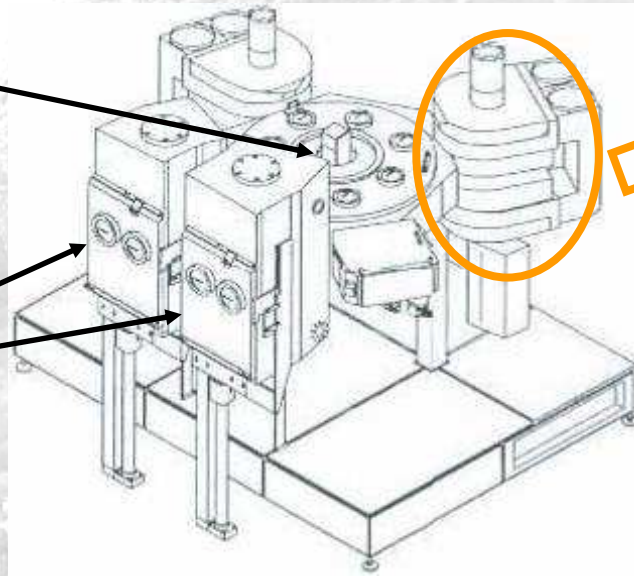
① dôme en quartz

② suscepteur

③ lampes

Chambre
de transfert

Sas de
chargement



Chambre de dépôt

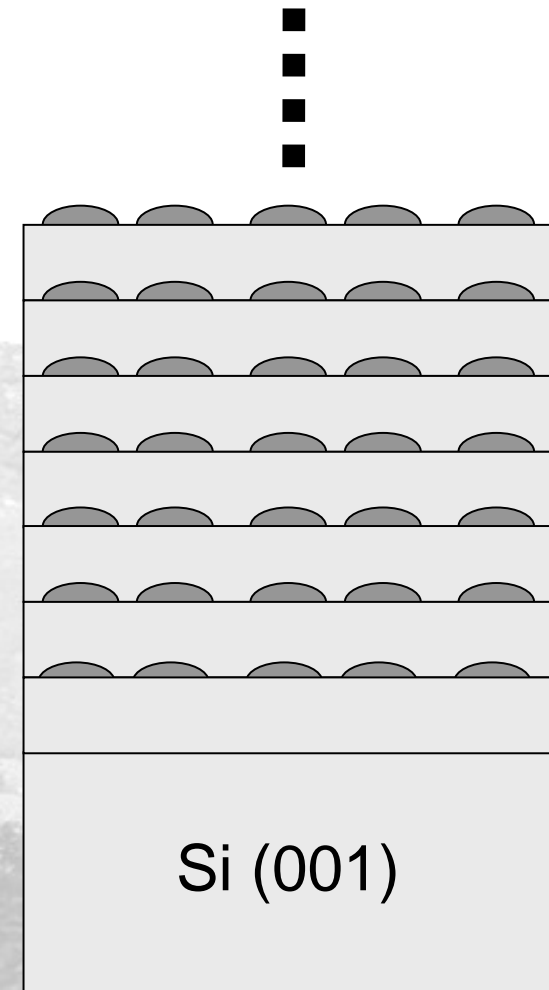


Démarche utilisée pour l'élaboration de SRBQ Ge / SiGe-p⁺



I. Réalisation de SRBQ Ge / Si

- 1) Ge / plaquette Si (001) : AFM (taille, densité)
- 2) Ge / Si / Si mono : AFM (taille, densité)
- 3) Ge / Si / Ge / Si...: AFM (empilement)
- 4) SRBQ Ge / Si : MET (résultat final)



I. Réalisation de SRBQ Ge / Si

1) Ge / plaquette Si (001) : AFM (taille, densité)

2) Ge / Si / Si mono : AFM (taille, densité)

3) Ge / Si / Ge / Si... : AFM (empilement)

4) SRBQ Ge / Si : MET (résultat final)

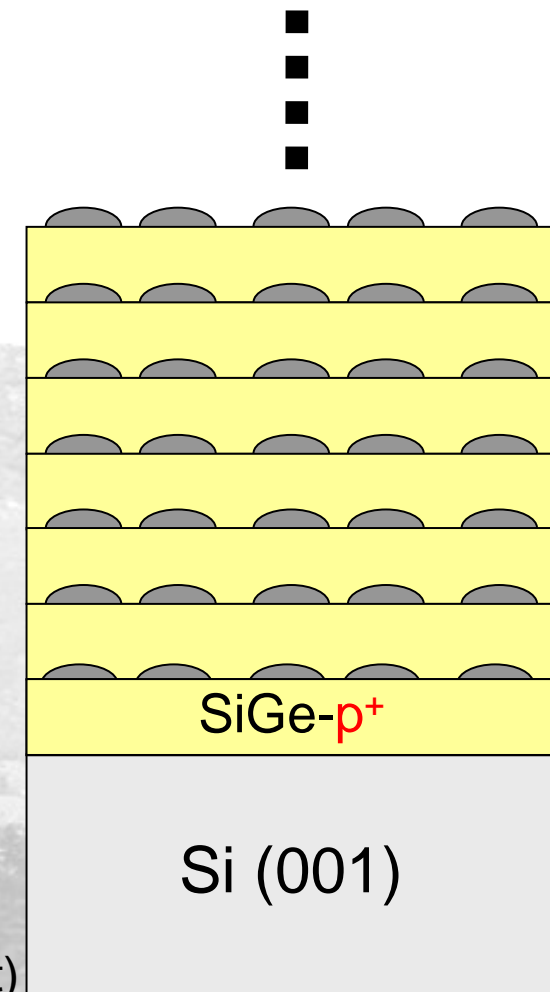
II. Réalisation de SRBQ Ge / SiGe-p⁺

1) Ge / SiGe / Si mono : AFM (taille, densité, effet du remplacement de Si par SiGe)

2) Ge / SiGe-p⁺ / Si mono: AFM (effet du dopage)

3) Ge / SiGe-p⁺ / Ge / SiGe-p⁺... : AFM / MEB (empilement)

4) SRBQ Ge / SiGe-p⁺ : MEB / MET (résultat final)



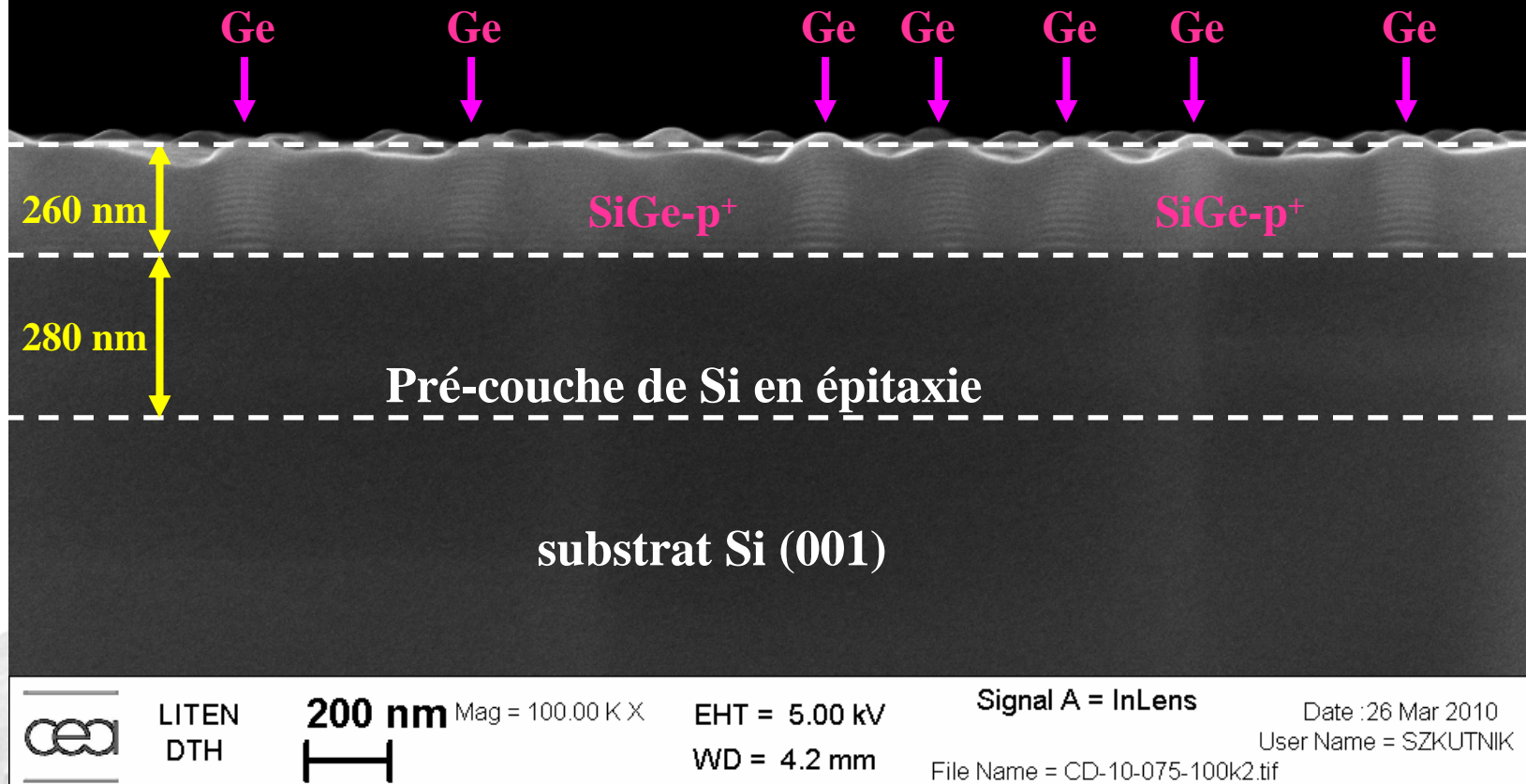
Les super-réseaux de boîtes quantiques à base de SiGe

- ❖ Pourquoi ?
- ❖ Comment ?
- ❖ Quels résultats ?

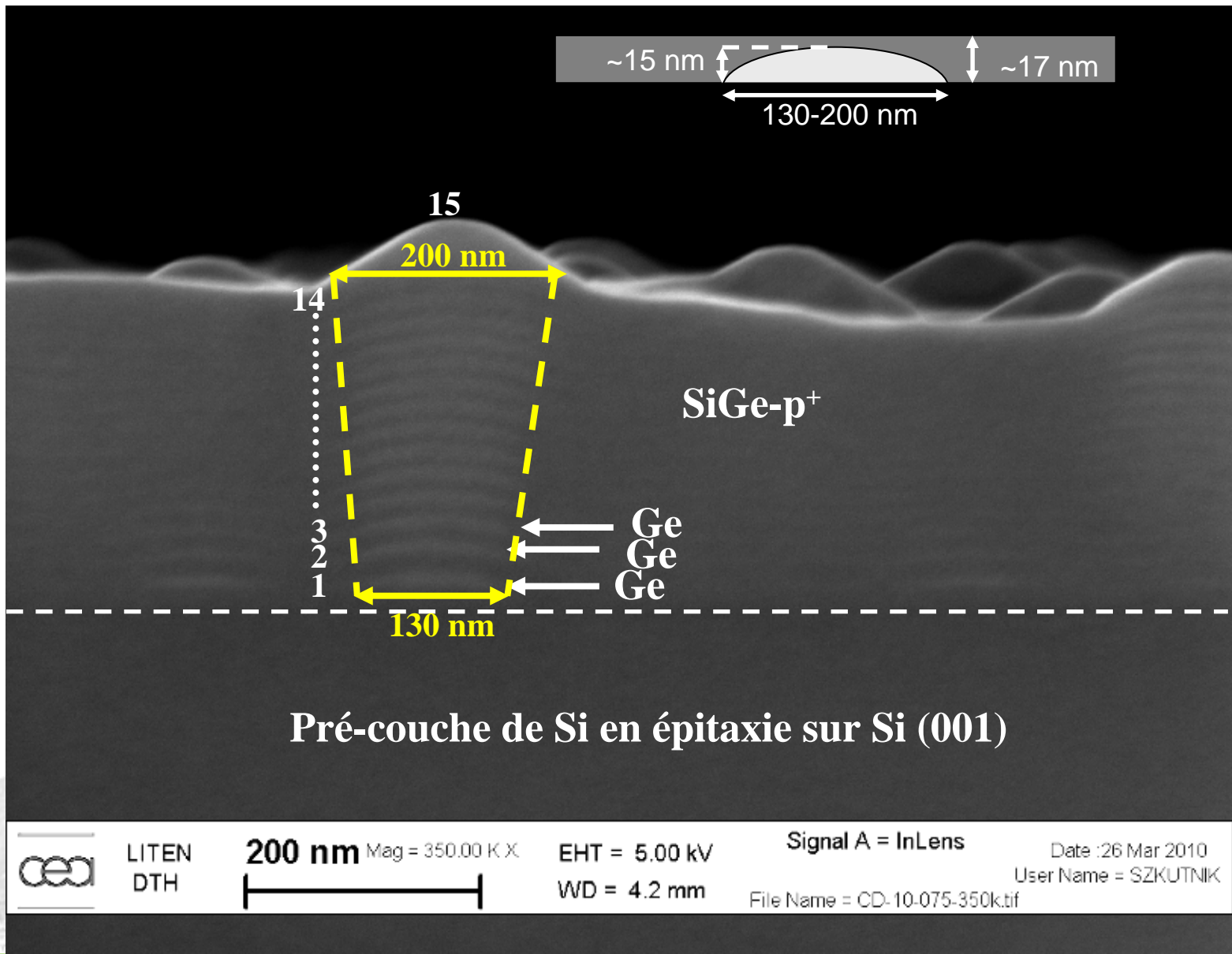
Croissance de SRBQ dopées : cas n°1

Observations :

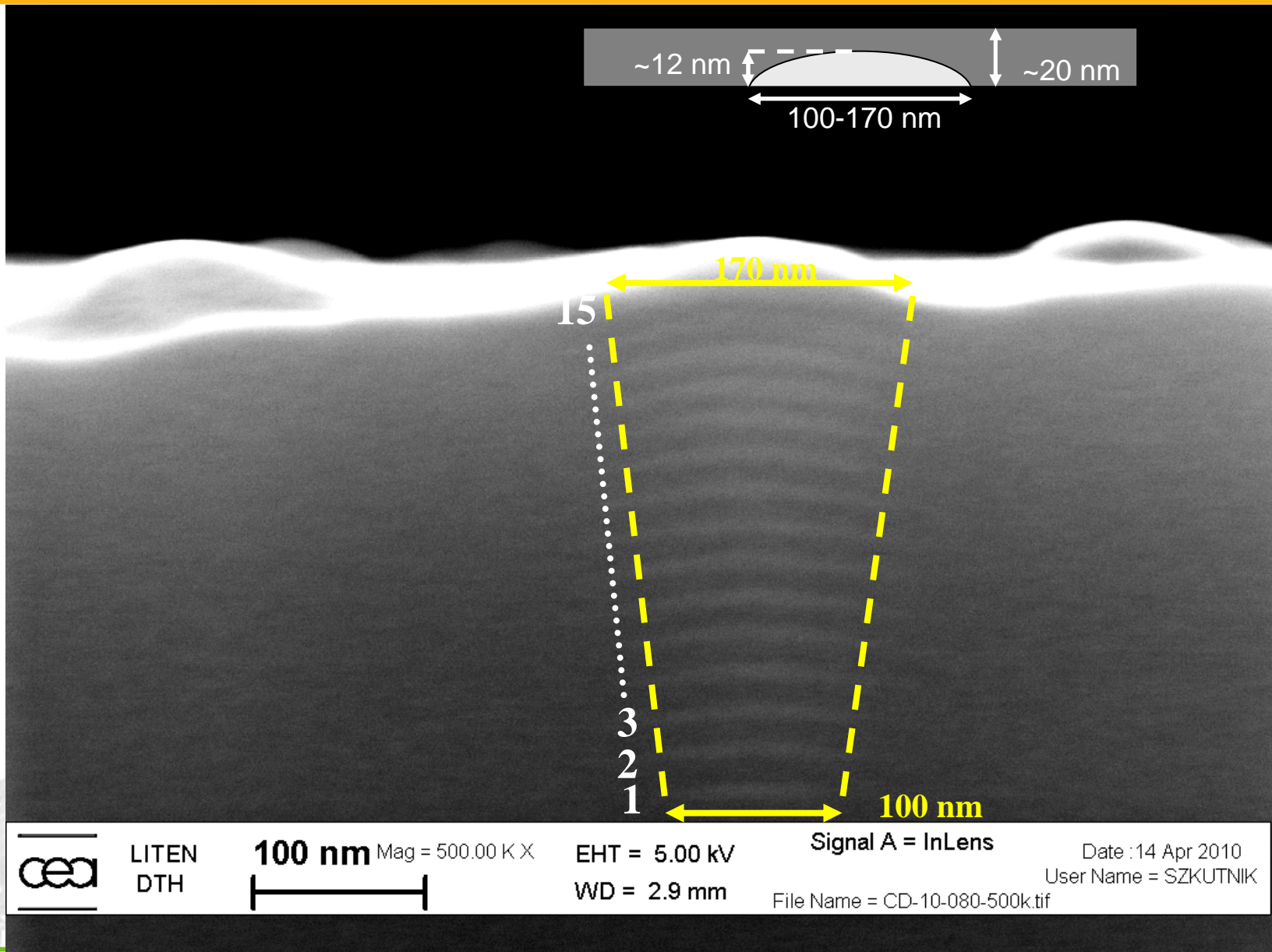
- matrice SiGe **monocristalline** et **dopée p⁺**
- nette corrélation verticale entre les boîtes de Ge



Croissance de SRBQ dopées : cas n°1



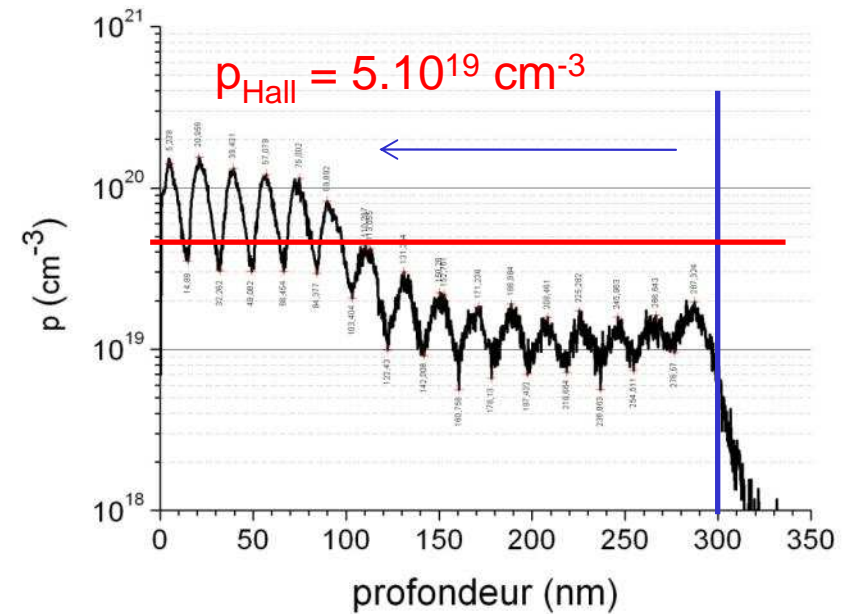
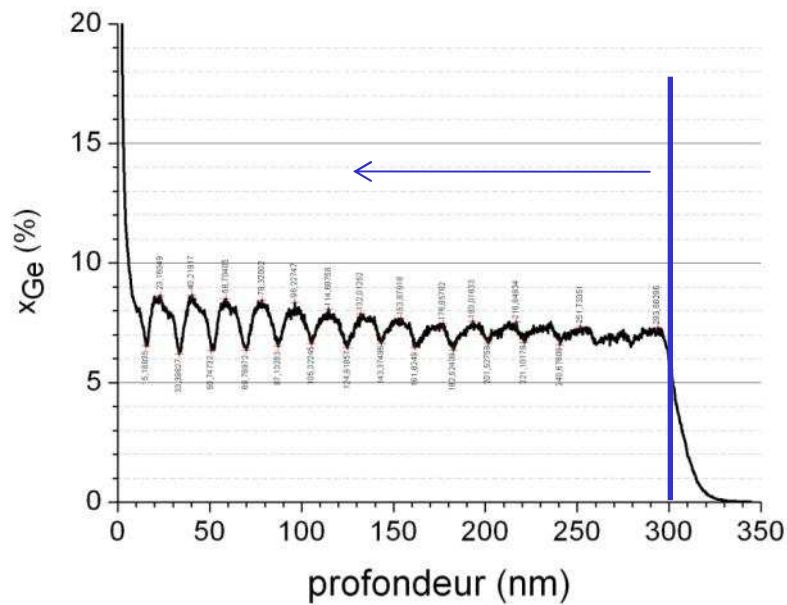
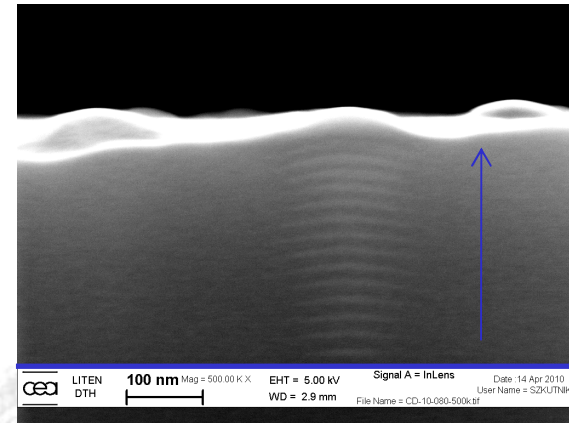
Croissance de SRBQ dopées : cas n°2



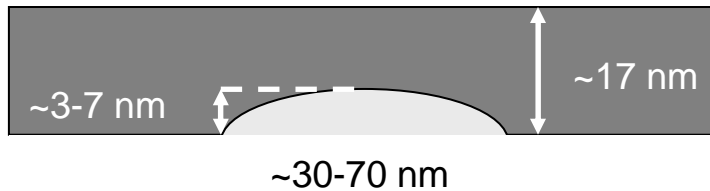
Croissance de SRBQ dopées : cas n°2

Analyses SIMS :

- Composition moyenne en Ge : 7-8%
- Dopage inhomogène dans la couche : entre 10^{19} et 10^{20} cm⁻³
- Oscillations des profils SIMS : on retrouve la périodicité



Croissance de SRBQ dopées : cas n°3

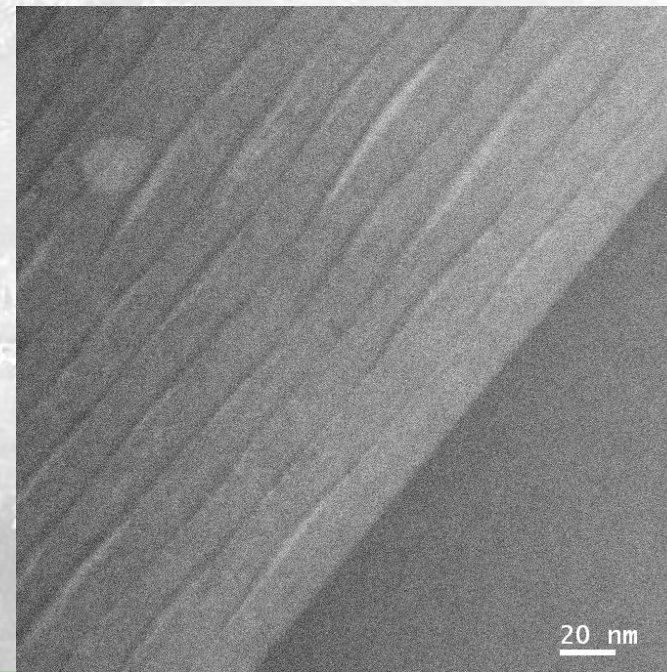
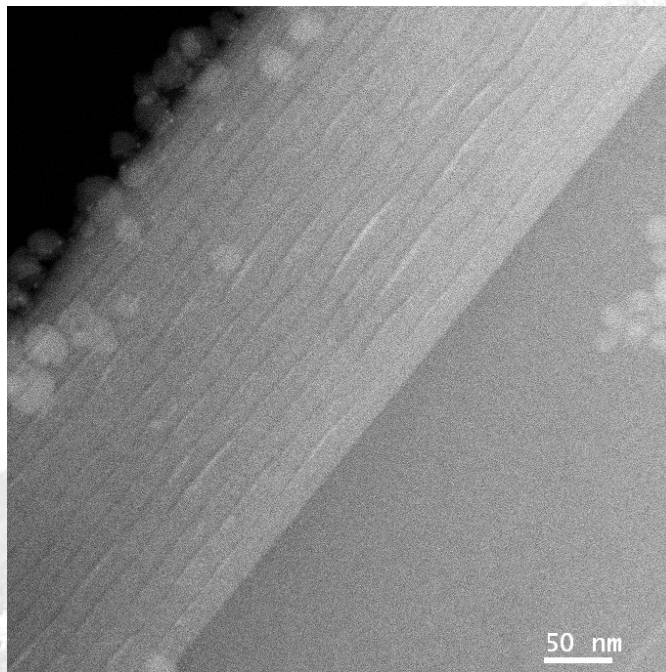


Observations :

15 couches bien définies de 17 nm d'épaisseur

Aucun défaut cristallin constaté / pas de corrélation verticale

Composition moyenne en Ge : 8 %



Conclusions :

- Élaboration de SRBQ Ge / SiGe-p⁺ : ok
- Élaboration de SRBQ Ge / SiGe-n⁺ : ok
- Mesures SIMS / électriques (sur SRBQ Ge / SiGe-p⁺) : ok

Perspectives :

- Mesures thermiques (3ω , thermoréfectance*) : en cours
- Mesures de contraintes (μ -Raman**) : en cours
- Mesures de σ , λ et S (transverse) : en développement
- Caractérisations de SRBQ Ge / SiGe-n⁺ : en cours

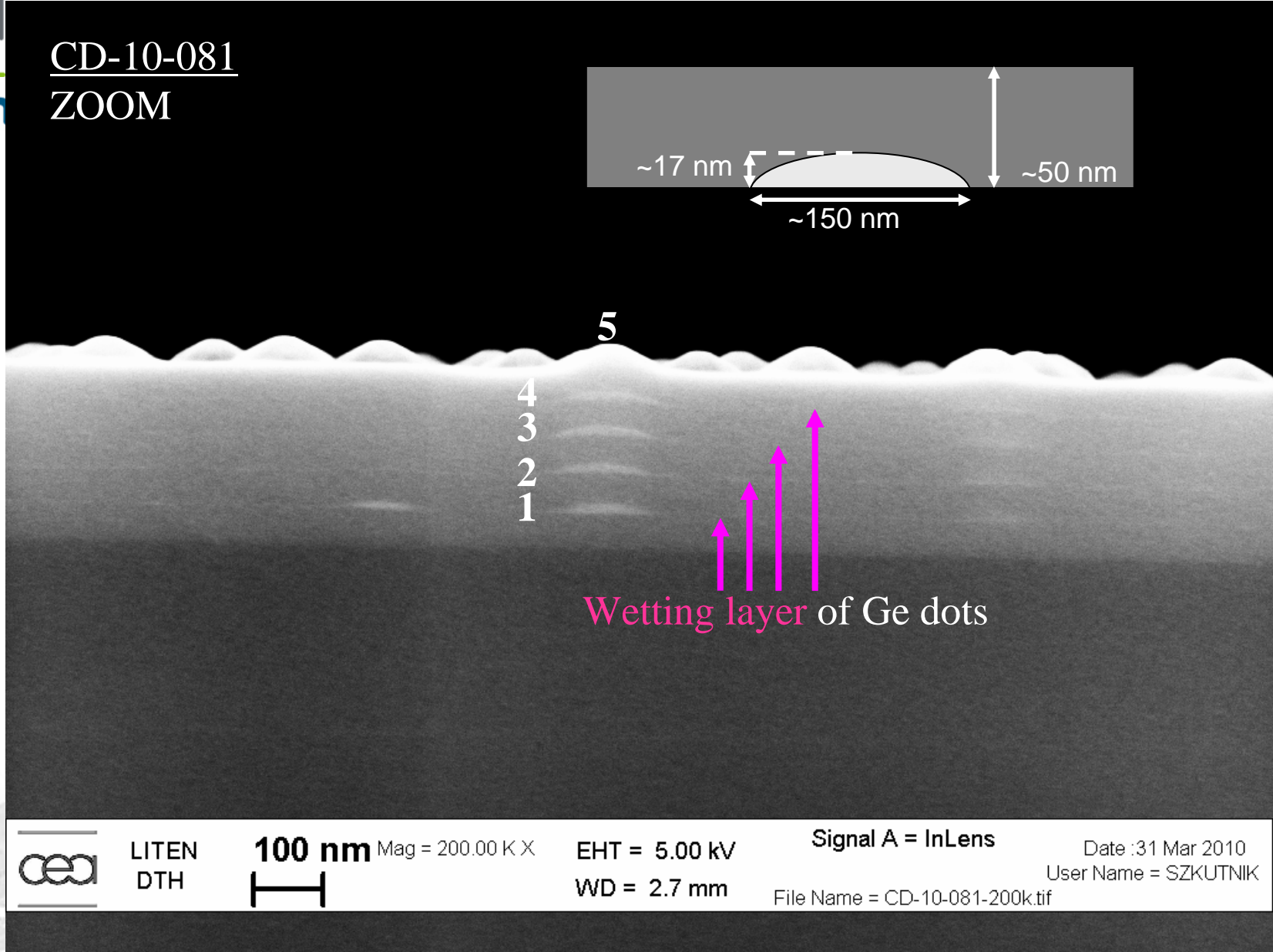
* Collaboration avec le CPMOH (Bordeaux) dans le cadre du projet ANR « Thermaescape »

** Collaboration avec LPICM (Polytechnique) dans le cadre du projet ANR « Thermaescape »

Merci de votre attention !!

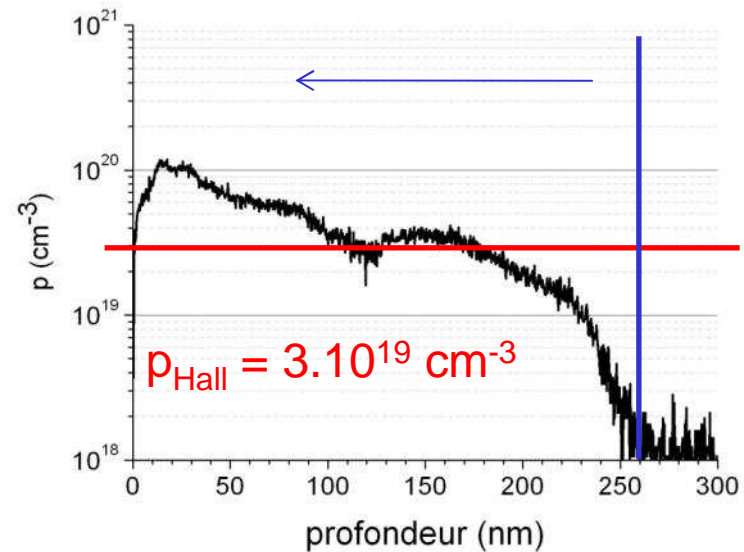
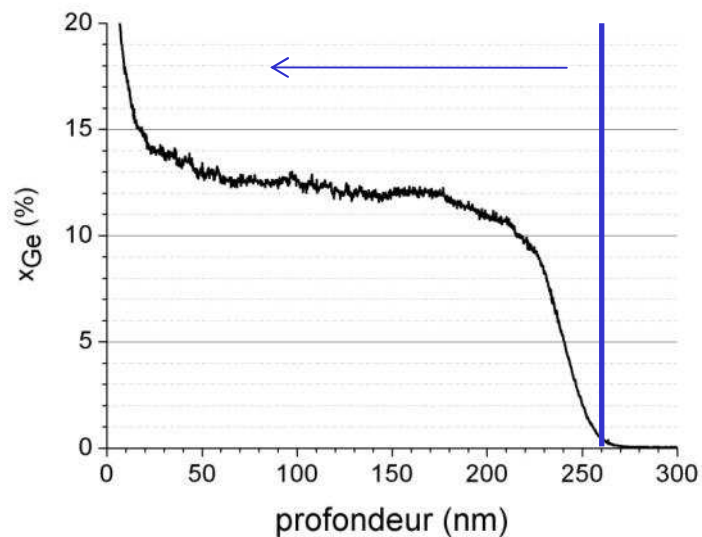
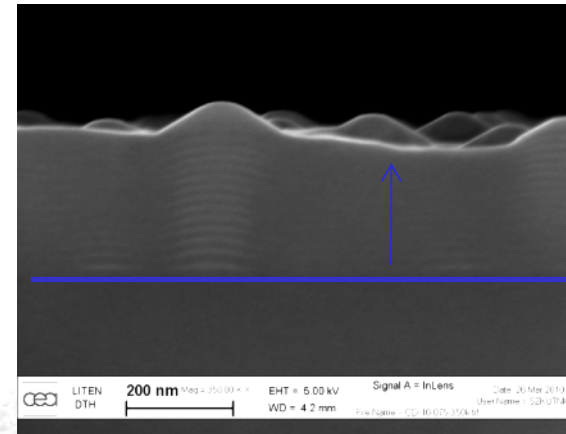


CD-10-081
ZOOM

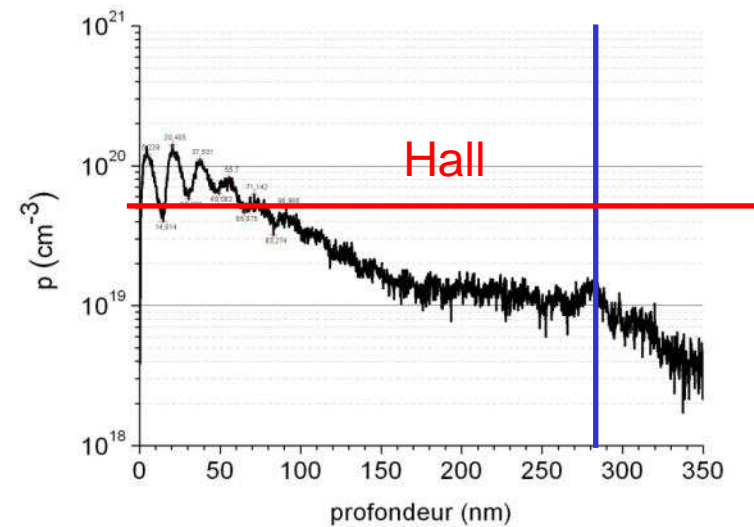
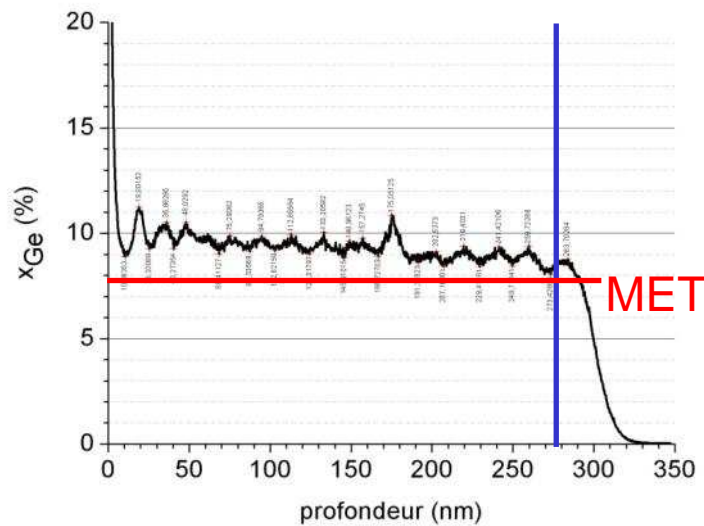
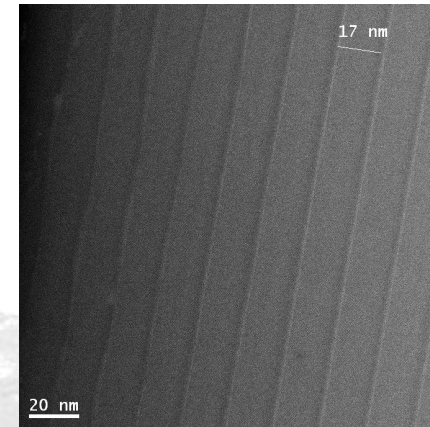


Analyses SIMS :

- Composition moyenne en Ge : 12-13%
- Dopage inhomogène dans la couche : entre 10^{19} et 10^{20} cm^{-3} .



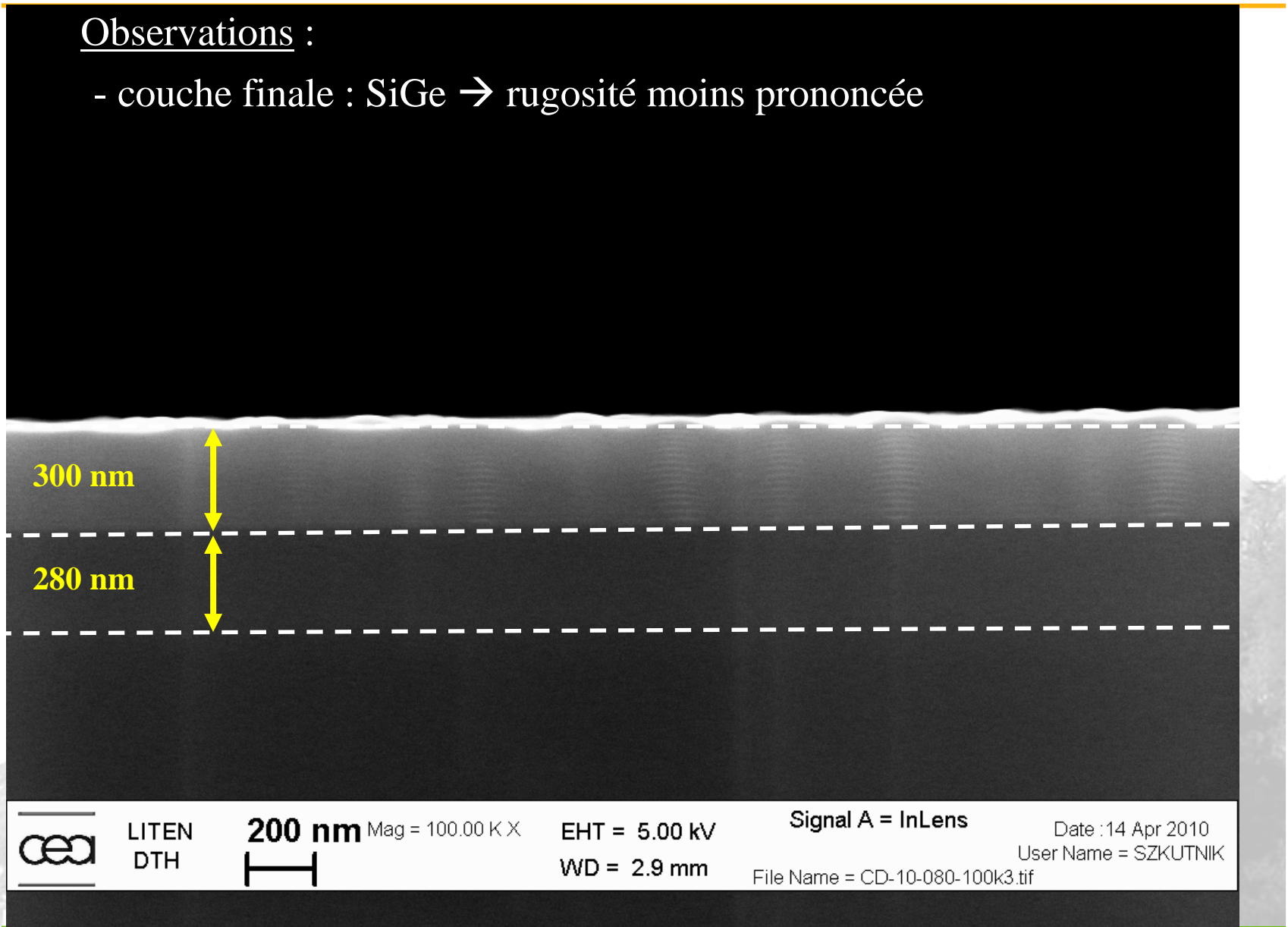
CD-10-087 (SIMS)

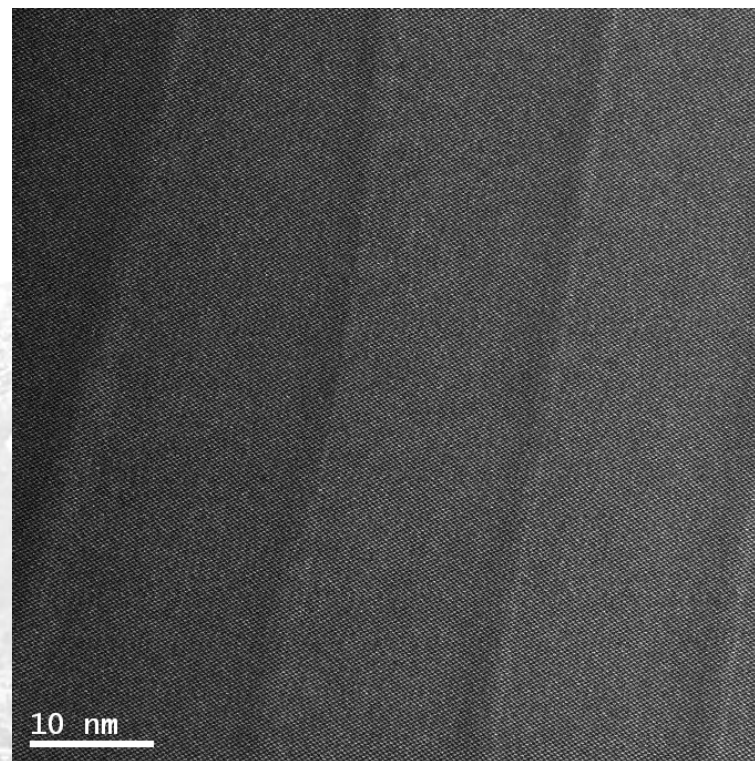
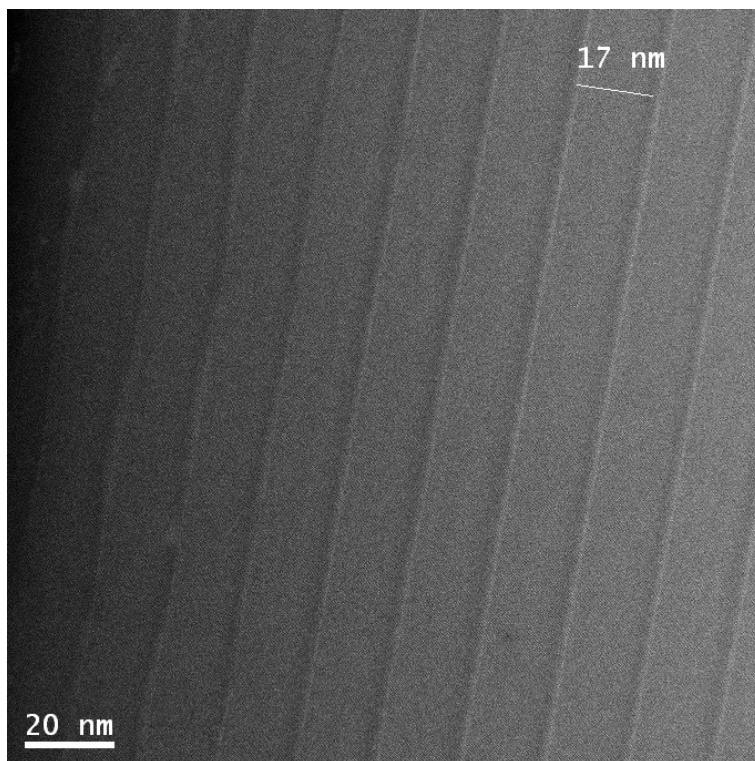


Croissance de SRBQ dopées : cas n°2

Observations :

- couche finale : SiGe → rugosité moins prononcée



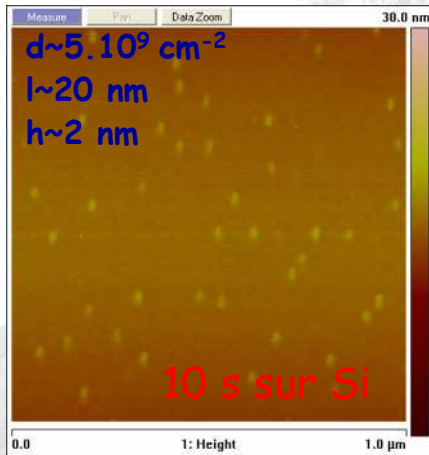
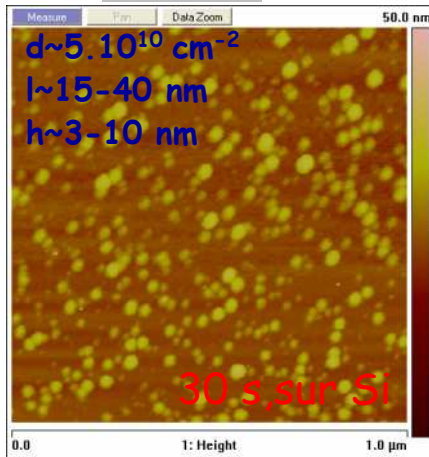


Principaux résultats

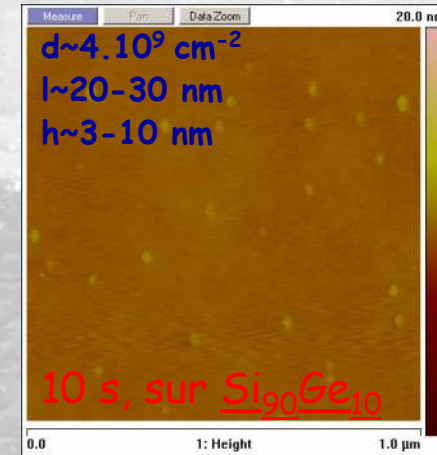
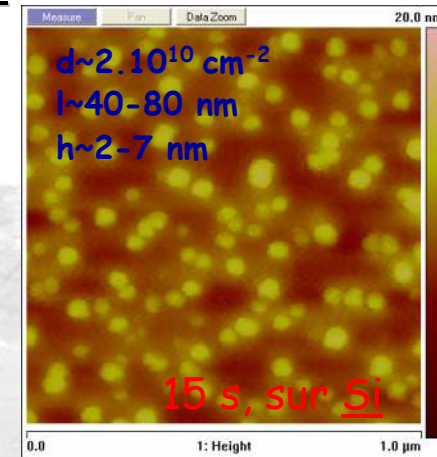
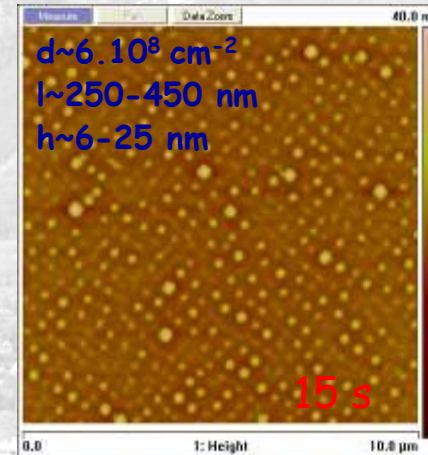
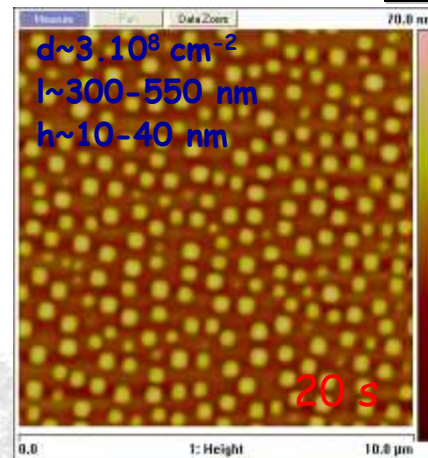
Élaboration de super-réseaux de boîtes quantiques

Essais de croissance de boîtes quantiques de Ge à 750°C et 1000°C

À 750°C



À 1000°C



Sans surfactants

Avec surfactants