

Dépendance en température des propriétés de conduction du silicium massif

Niveau pédagogique Licence EEA

A. CAZARRE - R. VEHIL - G .BONNET - F. MORANCHO - P. AUSTIN

Université Paul Sabatier Toulouse III - LAAS CNRS

7, av. du Colonel Roche 31 077 Toulouse, email : cazarre@laas.fr

1) Partie expérimentale :

Pourquoi cette expérience ?

L'évolution du marché des semi - conducteurs et de la microélectronique en général, impose que les cursus de formations associés abordent, dès le second cycle et de façon pratique, les caractéristiques principales des matériaux semi - conducteurs tels qu'ils sont contraints de fonctionner dans les composants et circuits. Ces notions certes élémentaires doivent permettre aux étudiants d'aborder de manière pratique les semi-conducteurs et de concrétiser les points développés lors des cours magistraux dispensés dans les filières EEA tant dans les formations universitaires que dans les écoles d'ingénieurs. Par ailleurs, outre l'étude des semi - conducteurs, cette approche permet aux étudiants d'appréhender un environnement de mesure original et d'acquérir la notion d'ordre de grandeur. La comparaison avec des simulations n'est certes pas évidente car elle nécessite la présence de l'outil CAO mais elle est un très bon complément à l'analyse des résultats expérimentaux. Forts de cette initiation, les étudiants pourront par la suite aborder le domaine de la technologie, de la physique des composants et enfin la CAO à un niveau supérieur.

1.a) Présentation du banc de caractérisation

Cette séance de travaux pratiques (TP) a pour objectif d'étudier de manière simple les propriétés de conduction du matériau semi - conducteur le plus usuel en microélectronique : le silicium.

Pour cela on utilise un dispositif expérimental fixe, pré - câblé et basé sur la mesure de la résistivité par la méthode des quatre pointes avec la possibilité d'étudier l'influence de la température (figure 1). Le principe de cette méthode est présenté en travaux dirigés ainsi que dans le manuel de Travaux Pratiques. La documentation technique de l'appareillage est également à la disposition des étudiants. Certaines précautions de manipulation doivent être prises par les étudiants. Par exemple, ils ne doivent pas toucher le support de plaquette au moment des mesures à température élevée (100 °C). Les appareils mis à la disposition des étudiants sont fragiles et l'opérateur doit donc les manipuler avec soin. De plus, les montages ne doivent en aucun cas être modifiés

Ce banc dont le coût global est de l'ordre d'environ 9000 Euros comprend :

- Une station de mesure SIGNATONE équipée d'une tête 4 pointes JANDEL distantes de 1,5 mm (température maximale tolérée de 150°C).

- Un support chauffant muni d'un circuit de refroidissement.
- Un système de régulation de température.
- Des plaquettes de silicium de type N et de type P, de diamètre 10 cm et d'épaisseur $e = 500 \mu\text{m}$ ou encore de diamètre 5 cm et d'épaisseur $e = 200$ à $300 \mu\text{m}$ présentant une gamme de résistivités assez large (faibles dopages et forts dopages).

Le matériel annexe comporte :

- Une alimentation en courant à réglage fin qui doit être capable de fournir un courant stable de l'ordre du mA même sur des substrats très résistifs, un micro-ampèremètre, un voltmètre, un thermomètre et des pincettes.
- Un système de pompage et un récipient de volume suffisant pour assurer un refroidissement convenable.

Ce montage expérimental est en outre muni d'un système d'acquisition. Ce dernier facilite l'exploitation des mesures, notamment celles concernant les fluctuations de tension que l'on observe sur les substrats les plus résistifs et qui rendent difficile la détermination précise de la résistance V / I .

1.b) Résultats expérimentaux.

Le but de cette expérience est de comparer des résultats de mesures réalisées sur des plaquettes de Si de type N et de type P avec différents niveaux de dopages variant de 10^{13} à $2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. La première étape consiste en une caractérisation à température ambiante. A partir du rapport V/I , on calcule la résistance par carré ($R_{\text{carré}}$) puis la résistivité. Les dopages et les mobilités sont extraits des abaques classiquement exploités dans les salles blanches [1] (figure 2).

Précisons que la relation entre $R_{\text{carré}}$ et V/I est donnée par la relation $R_{\text{carré}} = 4,53 V/I$, le coefficient 4,53 étant valable dès lors que le rapport épaisseur du substrat/intervalle entre pointes reste inférieur à 0,4. Si ce rapport excède 0,4, $R_{\text{carré}}$ doit être multiplié par un facteur de correction F inférieur à 1 [2,3].

L'étude suivante a été menée en fonction de la température (entre 25 et 125 °C). L'objectif est de mettre en évidence l'augmentation de la résistivité (figures 3.a et 3.b) ou la chute de mobilité à haute température (figures 4.a et 4.b). L'étudiant peut observer expérimentalement la forte sensibilité de la mobilité des porteurs libres à la montée en température d'un semi - conducteur faiblement dopé et sa faible dépendance dans le cas de forts dopages. Il s'agit là d'un point important qui permet d'identifier certaines dégradations de performances au niveau du comportement électrique des diodes et transistors suite à l'auto - échauffement.

Les méthodes de caractérisations industrielles actuellement utilisées permettent de mesurer le profil de dopage et par voie de conséquence la variation de résistivité dans le cas d'un profil de dopage diffusé ou implanté de type Gaussien : c'est le Spreading Résistance. Cette technique, lourde et très coûteuse, est seulement présentée au niveau de nos formations de 5^{ème} année spécialisées en microélectronique afin d'illustrer le profil de dopage des jonctions PN (voir le site de l'Atelier Interuniversitaire de Micro électronique : aime.insa-tlse.fr).

2) Comparaison avec la simulation : environnement ISE ou SILVACO.

L'objectif de cette partie est de montrer aux étudiants qu'il est possible de modéliser les propriétés de conduction du silicium avec des outils usuels de CAO. Des variations de

mobilités issues de l'approche ISE seront comparées aux mesures précédentes (figure 4.b). On pourra également comparer ces valeurs à celles que l'on peut trouver dans la littérature [4]. Une initiation aux outils de simulations SILVACO est d'ores et déjà en place au sein des modules de microélectronique de maîtrise EEA et de 3^{ème} année de l'I.U.P AISEM : elle concerne la simulation de caractéristiques électriques en fonction de paramètres technologiques fondamentaux. Un point particulièrement important à notre avis concerne les variations de la concentration intrinsèque avec la température (figure 5), puis la déduction, pour différentes valeurs de dopage, de la concentration en porteurs minoritaires (figure 6). Cette dernière est déduite de la loi d'action de masse ($p.n = n_i^2 = N_c N_v \exp - E_g / kT$) [5] en posant dans le cas d'un semi - conducteur de type N : $n = N_D$ et $p(T) = n_i^2(T) / N_D$.

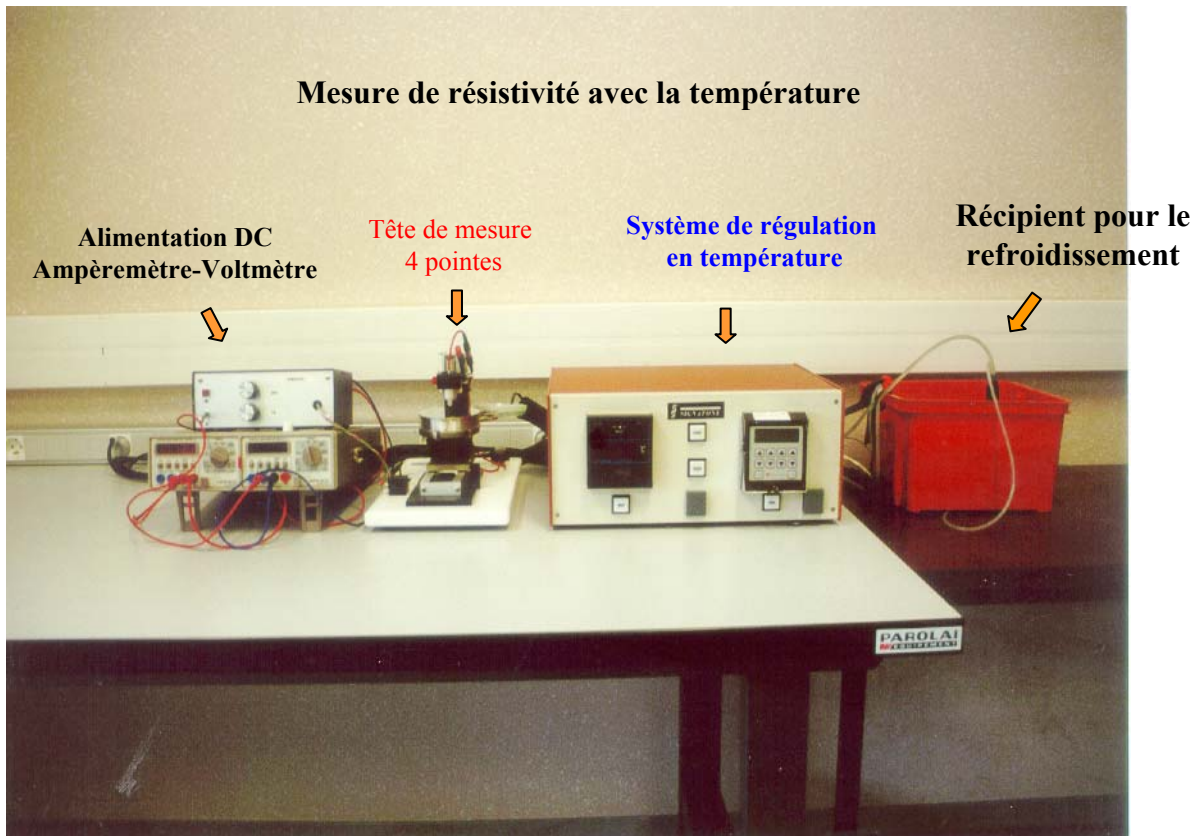
L'étudiant peut ainsi noter que la température limite T_i de passage à l'état intrinsèque, obtenue pour $N_D = n_i(T_i)$, est d'autant plus basse que le semi - conducteur est faiblement dopé. Sur la figure 6, nous pouvons observer que, pour une température T de l'ordre de 120 °C, la concentration de porteurs minoritaires p se rapproche de la concentration en atomes dopants pour $N_D = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. D'après la figure 5, on constate que la valeur de n_i est alors très voisine de 10^{13} cm^{-3} à 120 °C. Cela peut impliquer des modifications sensibles des propriétés de conduction dans le cadre de certains dispositifs de microélectronique tels que les composants de puissance à base de diodes PIN.

3) Conclusion

En conclusion, nous pouvons considérer que cette approche qui se veut purement expérimentale au niveau d'un cursus de licence est un bon outil pédagogique pour d'une part initier les étudiants à la mesure de résistivité sur un banc très spécifique et d'autre part découvrir les propriétés de conduction du silicium par la pratique, à condition toutefois, d'être capable de les confronter à des calculs théoriques développés en travaux dirigés. En ce qui concerne les résultats de simulation, un écart relativement important par rapport aux mesures est à noter, cependant ces résultats ne sont présentés qu'en guise de confrontation théorie/expérience.

Références bibliographiques :

- [1] Semiconductor handbook Technology, chap. 9 Physics, p6.
- [2] M. A. Green, M. W. Gunn, Solid-State Electronics 14 (1971), 1167.
- [3] M. A. Green, M. W. Gunn, Solid-State Electronics 15 (1972), 577.
- [4] Philips Transistor Engineering - Series dans Solid-State Engineering Mc Graw Hill book p.72.
- [5] JL Teissier et H. Brunet, Introduction à la physique des matériaux conducteurs et semiconducteurs, Dunod Université série violette.



Exemple de mesure : substrat type N faiblement dopé

$$e = 2.10^{-2} \text{ cm}$$

$$N_d = 2.10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

$$R_{\text{carré}} = 4,53 \frac{V}{I}$$

$$\rho = R_{\text{carré}} \cdot e = 0,0906 \cdot \frac{V}{I}$$

$$\mu_n = \frac{1}{qN_d \rho} = \frac{31250}{\rho}$$

$T_{\text{réelle}} (^{\circ}\text{C})$	23	30	40	60	80	90	100	110	120
I (mA)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
V (mV)	280	285	294	342	362	382	407	420	457
$R_{\text{carré}} (\Omega)$	1300	1291	1332	1549	1639	1730	1844	1902	2070
$\rho (\Omega \cdot \text{cm})$	24.5	25.82	26.64	31	32.8	34.6	37	38.05	41.14
$\mu_n (\text{cm}^2 \text{V}^{-1}\text{s}^{-1})$	1350	1210	1173	1008	953	903	847.5	821	755

Figure 1: Photographie du banc de mesure et exemple de résultats relevés.

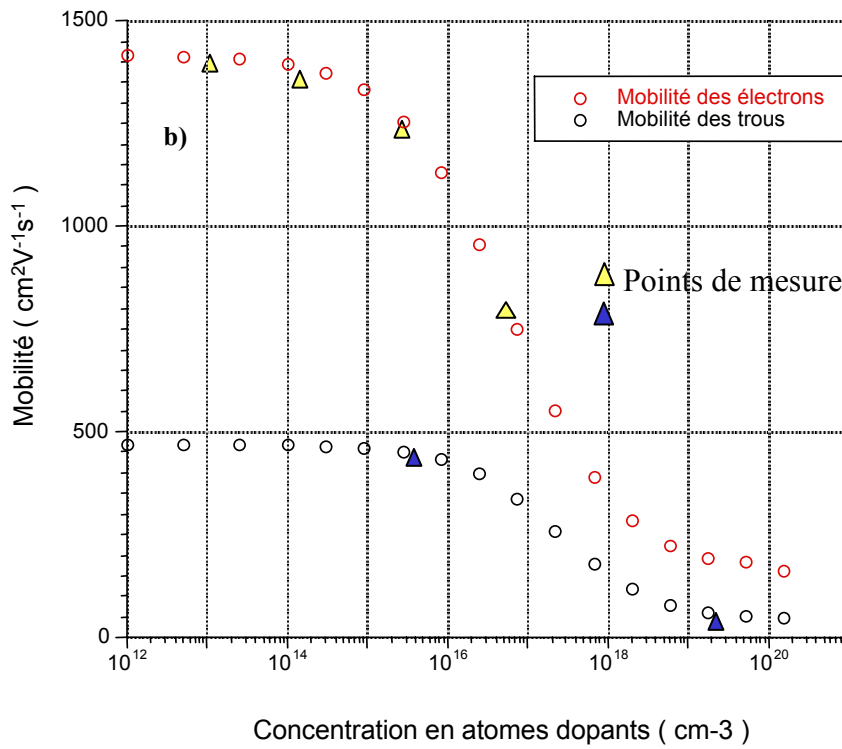
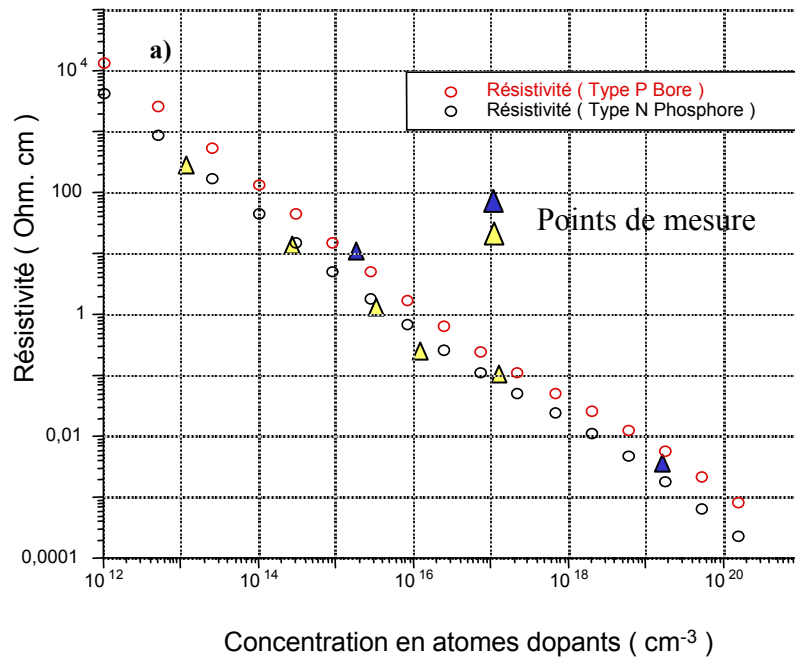


Figure 2: a) Résistivité et b) mobilité des porteurs dans Si à température ambiante: Comparaison entre la simulation (Simulateur ISE) et l'expérience.

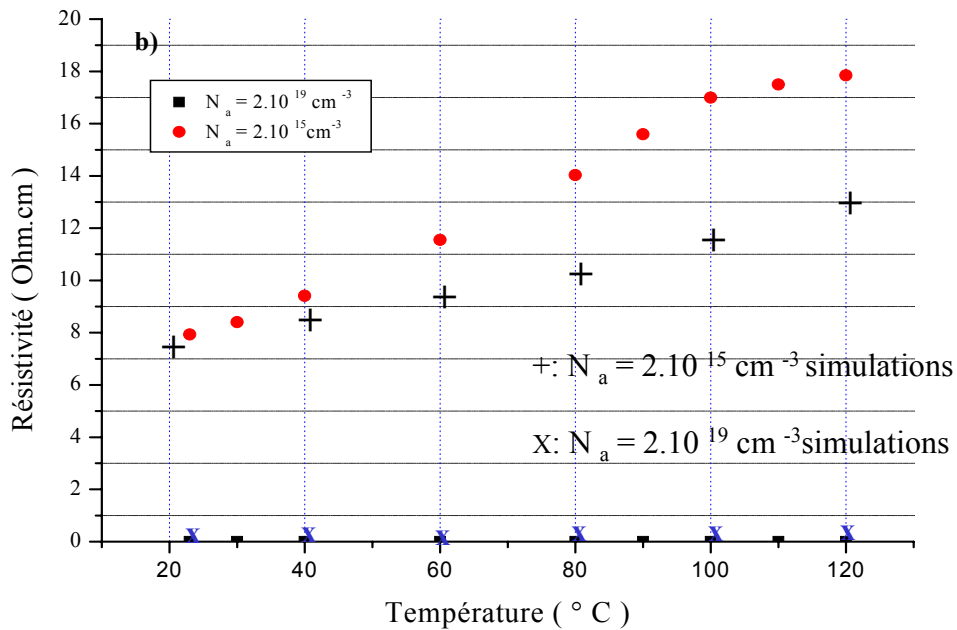
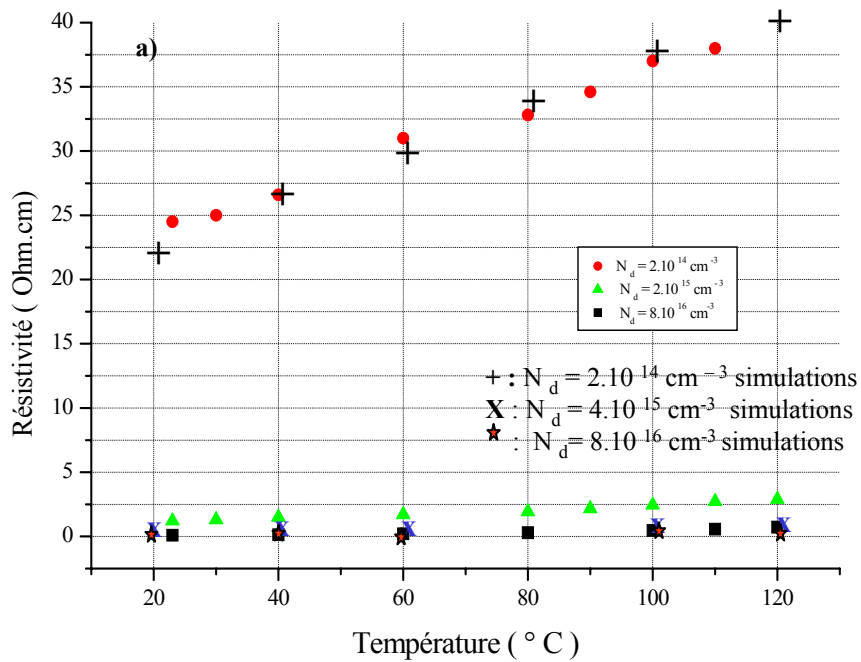


Figure 3: Variations des valeurs de résistivité, mesurées et issues de la simulation, avec la température dans du Si a) dopé N et b) dopé P

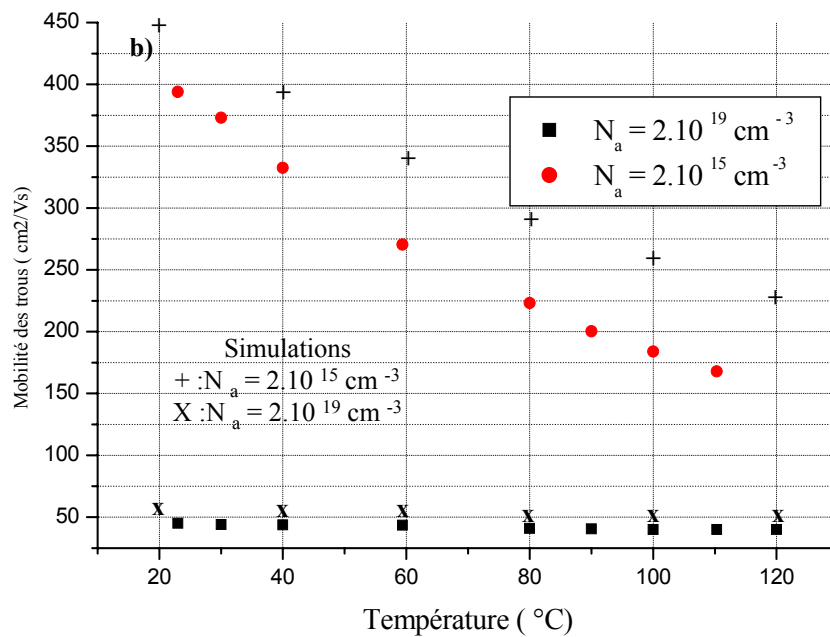
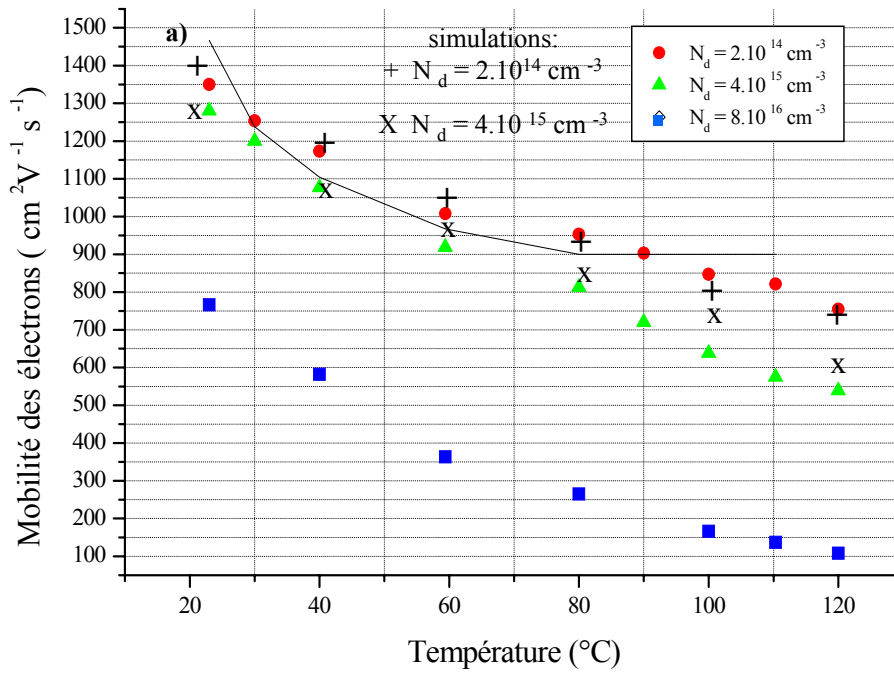


Figure 4: Variations des valeurs de mobilité, mesurées et issues de la simulation, avec la température dans du Si a) dopé N et b) dopé P.

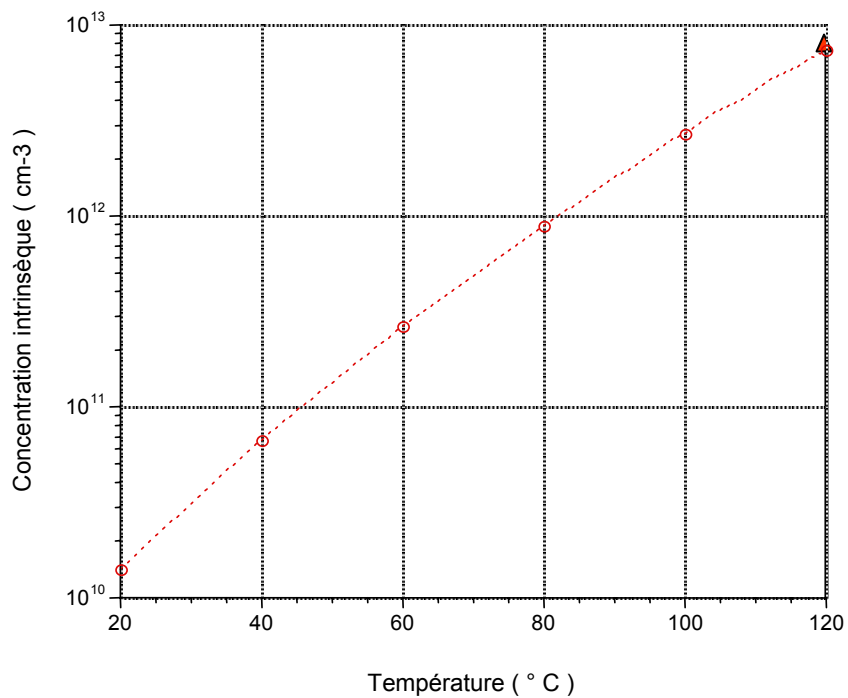


Figure 5: Evolution de la concentration intrinsèque du silicium avec la température

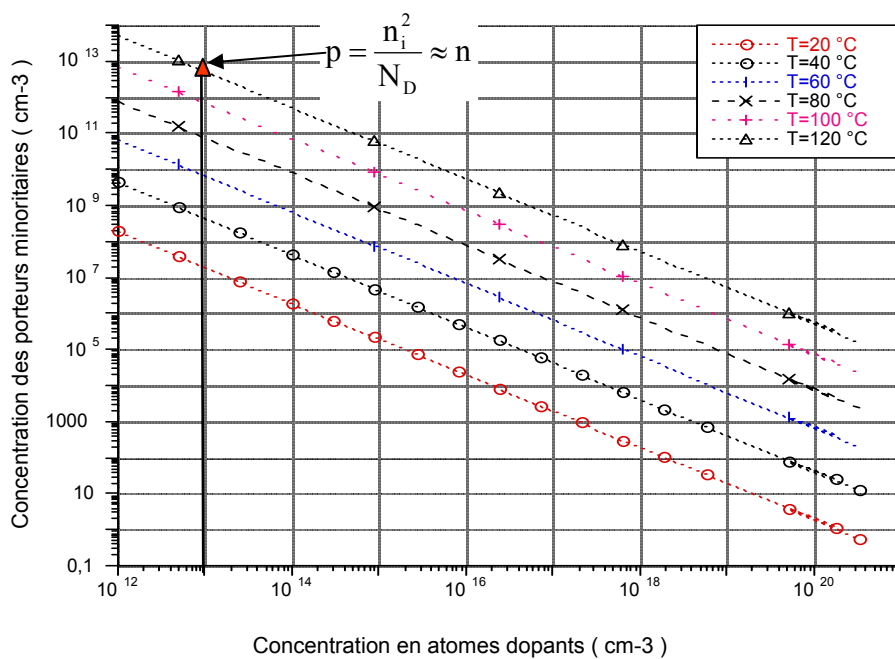


Figure 6: Concentrations des porteurs minoritaires en fonction du dopage pour différentes températures.