

# Gravure magnétique par laser

Godefroy Borduas

Université de Montréal - Département de physique

Cours PHY 3075

14 mars 2017

## 1 Introduction

Dans le monde informatique actuel, les diverses données sont transmises par le biais de nombreuses méthodes différentes. Que ce soit l'utilisation de disque BlueRay, de carte SD, de mémoire flash, l'espace de mémorisation dépasse généralement 32 Go de données voir de l'ordre du To pour les disques durs conventionnels. Néanmoins, à l'âge de bronze[1], les données étaient transmises grâce aux disques de type « floppy ». Ces disques avaient une capacité de l'ordre du Mo.

Bien que la technologie a été remplacée par la gravure optique, l'intérêt de la gravure magnétique par laser reste important. Elle représente une belle application du modèle d'Ising. Le présent rapport présente cette fameuse application. Après avoir validé le code décrivant le modèle d'Ising, ce dernier a été confirmé par des données témoins, ensuite, il a été adapté à la gravure magnétique par laser (GML) et finalement le modèle a été repoussé plus loin dans ses retranchements.

## 2 Théorie

### 2.1 Représentation de la magnétisation d'un matériau

Les matériaux ferromagnétiques sont des matériaux possédant une aimantation permanente. Toutefois, il existe des matériaux dits paramagnétiques qui peuvent être aimantés temporaire-

ment. Cette aimantation résulte de l'alignement du spin des atomes dans le matériau étudié.

En règlement général, il est possible de distinguer cet alignement en observant des domaines magnétiques c'est-à-dire des régions où les spins des différents atomes possèdent un alignement particulier.

Il revient à Ernst Ising la création d'un modèle pour simuler et étudier la magnétisation par l'alignement des spins d'un matériau. Son idée, simple à la base consiste en la création d'une grille de  $N$  atomes par  $M$  atomes possédant chacun un spin unique pour une couche 2D d'un matériau. Il est possible d'étendre le modèle pour un matériau 3D en ajoutant  $k$  couches de la grille 2D.

### 2.2 Évolution du modèle d'Ising

Le modèle d'Ising représente l'état des spins d'un matériau à un moment  $T$  donnée. Or, il est bien connu que deux spins l'influencent mutuellement. Ising ajoute donc à son modèle une série de règles décrivant le comportement des spins entre eux.

Dans le cadre de ce projet, il fut considéré que les spins voisins selon un stencil de von Neumann. De plus, l'énergie d'interaction des spins décrit par :

$$E_i = -J \sum_{j=1}^n s_i s_j - H s_i \quad (1)$$

L'équation 1 décrit l'énergie d'interaction entre le spin  $i$  et ses quatre voisins décrite par le

stencil de von Newmann. Dans cette équation, la variable  $J$  est une constante d'interaction entre les spins et  $H$  est la valeur du champ magnétique extérieur appliqué au matériau.

Lorsque l'énergie d'interaction 1 du spin  $i$  est plus grande que celle du même spin  $i$  inversé, le modèle utilisé prévoit l'inversion du spin  $i$ . Toutefois, cette condition n'est pas autosuffisante. Par la nature probabiliste de la mécanique quantique, il existe une probabilité que les spins ne s'inversent pas.

## 2.3 Algorithme de Metropolis

Pour contourner la nature probabiliste, une méthode de type Monte-Carlo fut utilisée pour connaître s'il y a inversion de spin.

L'algorithme de Metropolis prévoit que l'inversion de spin possède une probabilité de production de

$$p = \min \left[ 1, \exp \left( \frac{-\Delta E}{kT} \right) \right] \quad (2)$$

Où  $\Delta E = E' - E$  représente la différence d'énergie entre l'énergie d'itération du spin  $i$  inversé et l'énergie d'itération du spin  $i$ . Utilisant une distribution binominale, un nombre est tiré afin de déterminer s'il y aura inversion des spins.

## 2.4 Instabilité du système

Avenant une itération usuelle de la grille d'Ising, une problématique d'instabilité du système naîtra. En effet, en analysant chaque spin l'un après l'autre, chaque spin s'inverserait à chaque itération du système. La solution employée a été une analyse en damier ce qui permet de considérer la moitié des spins comme fixe et d'en ignorer la possible inversion. Par la suite, les spins ignorés sont analysés en considérant les spins précédents comme fixes.

## 3 Convergence entre le modèle et les résultats connus

### 3.1 Absence d'un champ magnétique externe

La première situation considérée a été une grille de 64x64 atomes avec absence de champ magnétique externe  $H = 0$ . Dans ce modèle, la constante d'interaction était fixée à  $J = 1$ . Les résultats de la simulation à trois températures  $T = 1.5$ ,  $T = 2.35$  et  $T = 5.0$  sont présentés aux figures 1 et 2.

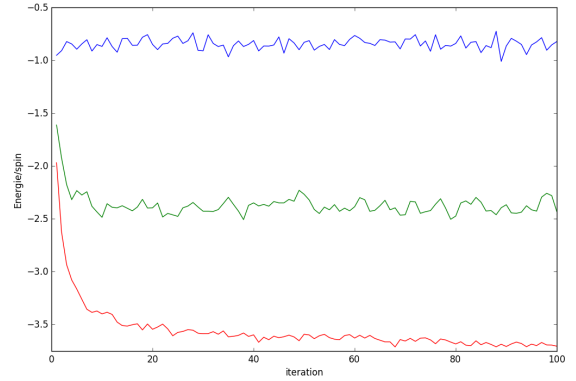


FIGURE 1 – Énergie par spin en fonction d'itération pour la simulation du modèle d'Ising à énergie d'interaction  $J = 1$  et un champ magnétique externe  $H = 0$  pour trois températures  $T = 1.5$  (en rouge)  $T = 2.35$  (en vert) et  $T = 5.0$  (en bleus)

Comme prévus, l'énergie moyenne par spin<sup>1</sup> Diminue avec le temps (le nombre d'itérations) et la valeur de stabilisation varie en fonction de la température. À  $T = 1.5$  l'énergie moyenne par spin à la stabilisation est de l'ordre de -3.5 par spin alors que cette valeur augmente à -1.0 par spin pour une température de l'ordre de  $T = 5.0$ .

Or la figure 2 démontre que la magnétisation totale par spin, décrit comme la somme moyennée des spins, se stabilise vers un alignement complet des spins dans une même direction (ici vers

1. L'énergie moyenne par spin est décrite comme l'énergie telle qu'à l'équation 1 divisé par le nombre d'atomes du réseau.

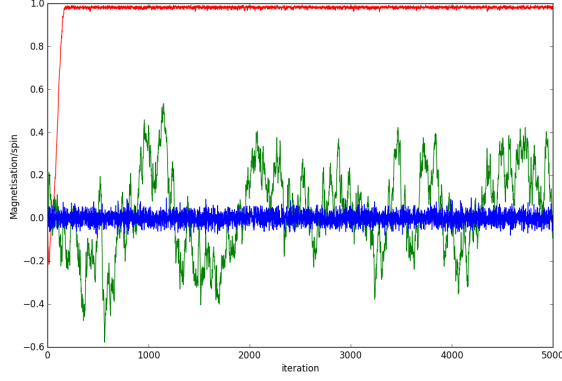


FIGURE 2 – Magnétisation par spin en fonction d'itération pour la simulation du modèle d'Ising à énergie d'interaction  $J = 1$  et un champ magnétique externe  $H = 0$  pour trois températures  $T = 1.5$  (en rouge),  $T = 2.35$  (en vert) et  $T = 5.0$  (en bleus)

le haut). Toutefois, plus que la température augmente, il semble que l'alignement des spins tend vers une magnétisation par spin nulle. Physiquement, ceci représente un alignement « moitié-moitié ». C'est-à-dire que la moitié des spins est aligné dans un sens et l'autre moitié est aligné dans le sens inverse. Néanmoins, la magnétisation pour la température  $T = 2.35$  semble aléatoire. Cela semble indiquer qu'un phénomène externe existe les spins qui recevront plus d'énergie ce qui aura pour effet de modifier leur orientation.

Ce phénomène est la température de Curie. Cette température représente le point où les matériaux perdent leur aimantation. C'est cette perte qui entraîne une inversion continue des spins ce qui conduit à l'état d'instabilité qui est visible.

### 3.2 Champ magnétique externe

Au vu de l'équation 1, la présence d'un champ magnétique externe influencera la magnétisation par spin. La figure 3 présente les résultats de l'ajout d'un champ magnétique sinusoïdale de la forme :

$$H(t) = H_0 \sin\left(\frac{2\pi t}{P}\right) \quad (3)$$

Comme le présente la figure 3 présente bien une magnétisation par spin sinusoïdale qui varie selon le champ magnétique maximal appliqué et la température.

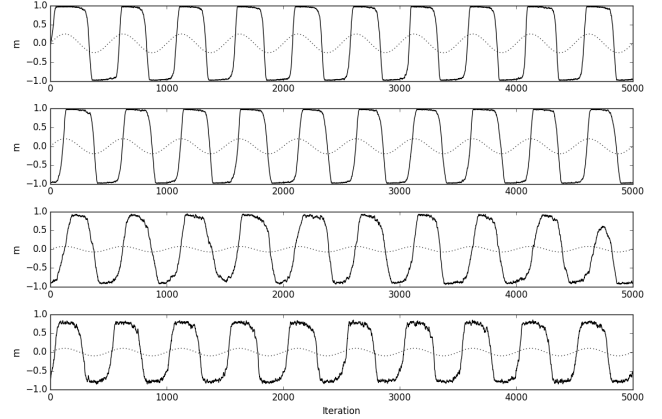


FIGURE 3 – Magnétisation par spin en fonction d'itération pour la simulation du modèle d'Ising à énergie d'interaction  $J = 1$  et un champ magnétique externe sinusoïdale pour quatre températures  $T = 1.75$  et champ d'amplitude  $H_0 = 0.25$  (en haut),  $T = 1.66$  et champ d'amplitude  $H_0 = 0.2$  (en deuxième),  $T = 2.0$  et  $H_0 = 0.075$  (en troisième) et  $T = 2.350$  et  $H_0 = 0.001$  (en dernier).

De plus, la figure 4 présente une gravure magnétique par laser avec une température maximale de 2.5. Cette température est assez proche de la température de Curie. Cette proximité entraîne une instabilité de l'écriture d'un bit comme le présentent les courbes rouge et vertes. Pour les mêmes conditions, les résultats peuvent être drastiquement différents, et ce de façon aléatoire. La figure 5 présente l'écriture finale du bit pour la température  $T_0 = 0.1$ . Tandis que la figure 6 présente l'écriture d'un bit pour les mêmes conditions à la température initiale de  $T_0 = 0.5$  et une température maximale de  $T = 2.5$ .

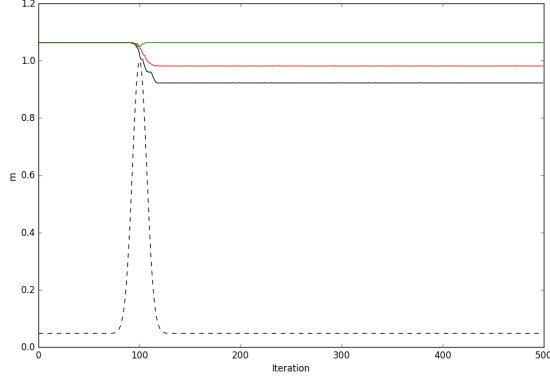


FIGURE 4 – Magnétisation par spin en fonction d'itération d'une gravure magnétique par laser sous un champ magnétique externe de  $H = -0.2$  avec une température globale maximale de 2.5. En noir, une analyse avec une température initiale  $T_0 = 0.1$ . En rouge et en vert, deux analyse avec une température initiale  $T_0 = 0.5$ .

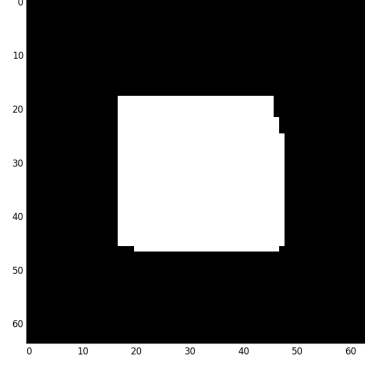


FIGURE 6 – Magnétisation par spin en fonction de iterationImage du réseau de spin suivant une gravure à une température initiale  $T_0 = 0.5$  et une température maximale de  $T = 2.5$ .

partout. Il semble donc nécessaire que la température initiale soit conservée à un niveau bas.

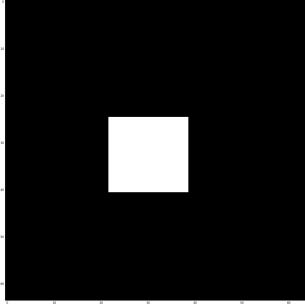


FIGURE 5 – Magnétisation par spin en fonction de iterationImage du réseau de spin suivant une gravure à une température initiale  $T_0 = 0.1$  et une température maximale de  $T = 2.5$ .

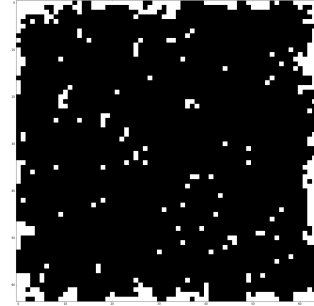


FIGURE 7 – Magnétisation par spin en fonction de iterationImage du réseau de spin suivant une gravure à une température initiale  $T_0 = 2.0$  et une température maximale de  $T = 2.5$ .

## 4 Exploration numérique

### 4.1 Température supérieure à $T = 0.5$

Lorsque la température initiale est de l'ordre de  $T = 2.0$  et que la température maximale est conservée à  $T = 2.5$ , nous remarquons que l'écriture du bit est beaucoup plus diffus. La figure 7 présente le résultat de cette simulation. L'inversion des bits n'est plus localisée et il est dispersé

De plus, la figure 8 démontre que le désordre augmente en fonction de la température initiale. Il est possible de conclure que la température doit être conservée à une température très basse, soit de l'ordre nul  $T \approx 0$ .

### 4.2 Voisinage à 8 voisins

Lorsque l'interaction à 8 voisins est considérée, les résultats obtenus sont ceux de la figure 9. Dans cette simulation, les paramètres étaient

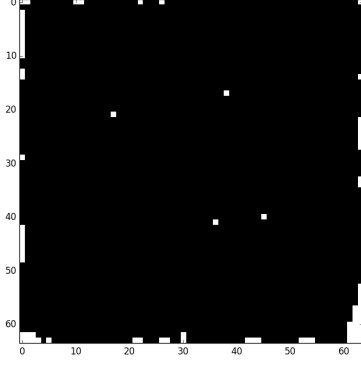


FIGURE 8 – Magnétisation par spin en fonction de iterationImage du réseau de spin suivant une gravure à une température initiale  $T_0 = 1.2$  et une température maximale de  $T = 2.5$ .

les mêmes que ceux de la figure ?? . Toutefois, la température initiale est deux fois moins élevée et la température du laser est beaucoup plus haut soit  $T = 15$ . Donc, il est nécessaire d'augmenter la température du laser lorsque l'interaction entre les spins augmente en fonction du nombre de voisins considérer. Ceci semble donc indiquer que l'énergie d'interaction contre-balance l'énergie du faisceau.

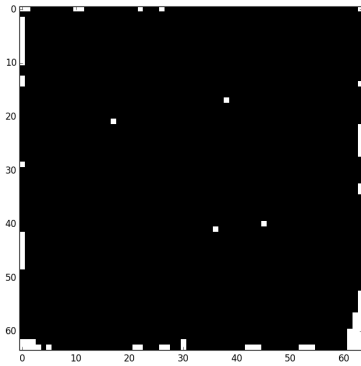


FIGURE 9 – Bits inscrits sur le réseau lors d'une interaction à 8 voisins. La température initiale est  $T_0 = 0.05$  et la température du faisceau est  $T = 15$ .

## 5 Conclusion

Dans différentes configurations, la gravure numérique dépend grandement des conditions extérieures et de la considération de l'interaction des voisins.

## Références

- [1] Paul CHARBONNEAU. *Notes de cours - PHY 3075*. 2017.