

Méthodes et protocoles de PSE – Phyllotaxie

I) Les éléments du montage expérimental

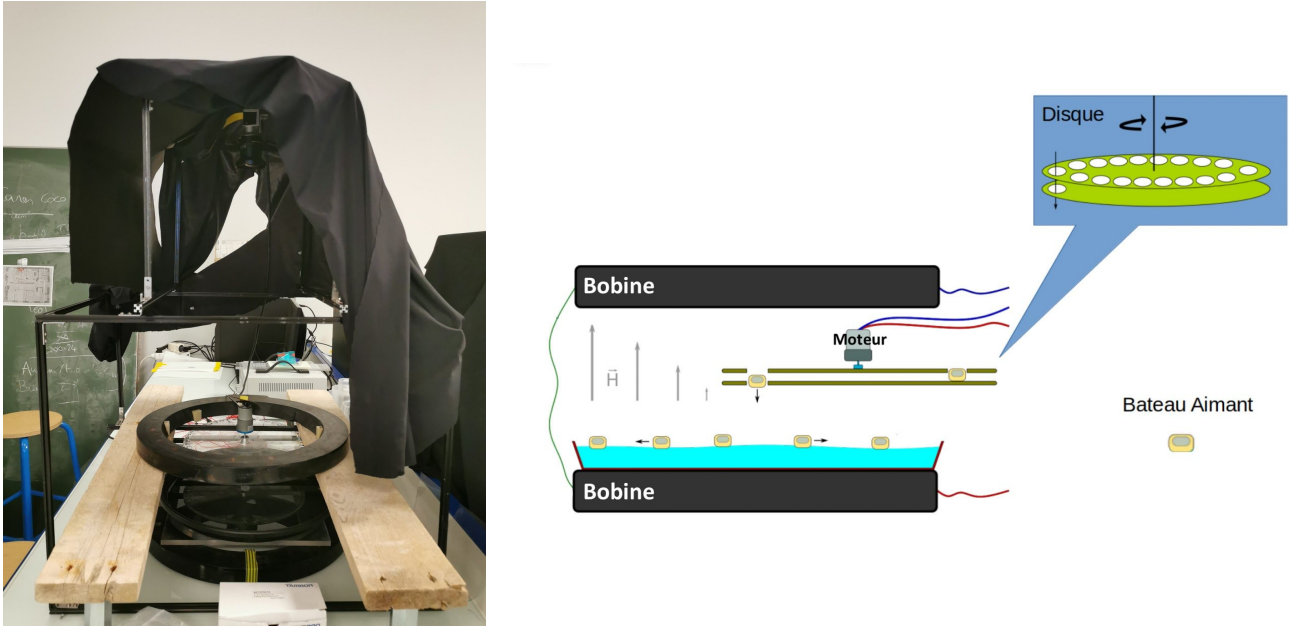


Figure 1 : Photo du montage vu de face (à gauche) et schéma simplifié du montage (à droite)

Le montage se compose de :

- Deux **bobines de Helmholtz** ayant un diamètre moyen de 32cm (modèle inconnu), fournissant un champ magnétique de 3,2mT (au point maximal) pour une alimentation de 1,6A. Elles sont écartées verticalement d'une distance légèrement supérieure à leur rayon (16,5cm) afin de créer un gradient de champ magnétique. La bobine supérieure est posée en travers de deux planches en bois (issues d'une palette de transport), elles mêmes supportées par quatre pieds métalliques ajustables.
- Deux **alimentations électriques** (Lavolta DC power supply BPS-305) : l'une servant à alimenter les bobines en courant, l'autre servant à alimenter le moteur en tension
- Une **cuve** en plastique noir peu profonde (de type soucoupes pour pots utilisées en jardinage) faisant environ la même taille que les bobines (diamètre de 30 cm), qu'on remplit avec le **liquide** de notre choix et où se déroulera l'expérience. Le liquides utilisés sont : eau, huile de tournesol, huile de silicone, glycérol, PEG-200.
- Des **flotteurs** de 10mm de diamètre composés de polystyrène (ils sont poinçonnés dans une plaque de polystyrène de 4mm d'épaisseur). Ils sont creusés au centre pour pouvoir y coller un **aimant circulaire NdFeB** (3mm de diamètre, 2mm d'épaisseur ; référence S-03-02-N sur le site supermagnete.fr). Ces "bateaux-aimants" sont recouverts d'une légère couche de peinture blanche (pour augmenter leur contraste lors du traitement des images avec Matlab).

- Un « **distributeur d'aimants** », il s'agit d'un dispositif que nous avons conçu afin d'introduire les flotteurs dans la cuve. Il est composé de :

- Un disque circulaire en plexiglas mobile (diamètre 32cm) réalisé à l'atelier de l'ESPCI, percé de 48 trous équidistants (diamètre 12mm) situés à 4mm du bord extérieur ; il y a également un trou central qui permet d'introduire le moteur décrit ci-dessous. Les flotteurs sont placés dans les trous extérieurs.
- Un second disque en plexiglas, placé sous le premier (à moins de 2mm d'écart), et percé d'un unique trou (diamètre 12mm) à 4mm du bord extérieur, et qui sera fixe. Les flotteurs ne pourront donc passer que par ce trou.
- Un moteur pas à pas (Makeblock) fixé seulement au disque supérieur et qui permet de le faire tourner. On peut régler sa vitesse en faisant varier la tension d'entrée sur l'alimentation à laquelle il est relié. La face supérieure du moteur est cachée par un carton noir (en lien avec le traitement des images avec Matlab).

Le distributeur est placé entre les deux bobines (à une distance d'environ 5cm de la surface du liquide dans la cuve) de telle sorte à ce que le trou du disque inférieur soit aligné avec le centre des bobines. Ainsi, lorsque le disque supérieur tourne, les aimants placés au préalable tombent un à un au centre de la cuve à travers le trou du disque inférieur.

- Une **caméra CCD** qui surplombe le montage, avec vue directe sur la cuve

- Un **cadre métallique** monté par nous-même (barres profilées en aluminium), qui permet de fixer le distributeur d'aimants à une hauteur voulue ainsi que la caméra

- Un **drap noir** qui recouvre la partie supérieure du cadre métallique pour éviter toute réflexion lumineuse dans la cuve qui gênerait les mesures

- Un **ordinateur** disposant du logiciel PylonViewer (Basler) permettant de choisir les réglages d'acquisition de la caméra et commencer/arrêter l'enregistrement.

II) Protocole des mesures

1) Centrage du distributeur d'aimants

Pour s'assurer que les aimants tombent bien au centre de la cuve, et donc que chaque direction soit équiprobable, nous avons utilisé un mètre pour trouver un diamètre des bobines, où nous avons fixé un fil en nylon. Nous avons réitéré la mesure pour un autre diamètre et un autre fil. Le point où ils se croisent correspond au centre de la bobine, ce qui permet de centrer les deux bobines et le trou du distributeur d'aimants.

2) Mesure du champ magnétique

La mesure du champ magnétique se fait avec un gaussmètre à sonde. On se place à moins d'un centimètre au dessus du fluide et, en maintenant une hauteur constante, on relève une quinzaine de valeurs de champ magnétique en partant du centre vers l'extérieur. Cela nous permet d'obtenir le gradient du champ pour l'écartement des bobines choisi.

3) Mesure du déplacement des flotteurs

- 1) On remplit la cuve avec le fluide sélectionné (au moins 1cm de profondeur).
- 2) On choisit le nombre de flotteurs qu'on veut étudier ainsi que la période approximative d'injection. On place l'ensemble de ces flotteurs dans le distributeur en les écartant d'un certain nombre de trous les uns par rapport au autre (en fonction de la période d'injection choisie).
- 3) On lance l'enregistrement de la caméra avant le démarrage du distributeur d'aimants (on règle les paramètres d'acquisition de telle sorte à avoir un nombre suffisant d'images par seconde et un bon contraste).
- 4) On démarre le distributeur juste après la caméra (pour éviter d'avoir des films trop longs inutilement). On doit vérifier que celui-ci ne bloque pas, problème récurrent car on fait tourner un disque de plexiglas sur un autre disque de plexiglas, ce qui engendre de la friction.
- 5) On arrête la caméra lorsque tous les flotteurs ont atteint le bord de la cuve.
- 6) On récupère l'ensemble des flotteurs manuellement et on les sèche avec du papier absorbant (on veut éviter d'introduire du fluide entre les disques du distributeur).

III) Modélisation du champ magnétique sur Matlab

Nous souhaitons connaître précisément le lien qui existe entre le gradient de champ magnétique et l'écartement des bobines l'une par rapport à l'autre. Pour cela, nous avons créé une modélisation numérique sur Matlab. Nous nous sommes basés sur la loi de Biot et Savart, qui donne le champ magnétique produit par un fil parcouru par un courant. La valeur du champ magnétique produit au centre des deux bobines parcourus par un courant est facilement trouvé analytiquement à partir de ce modèle. En revanche, le calcul pour une position quelconque entre les bobines nécessite une résolution numérique comme celle réalisée ici. Le programme qui nous avons employé est donné en annexe 1.

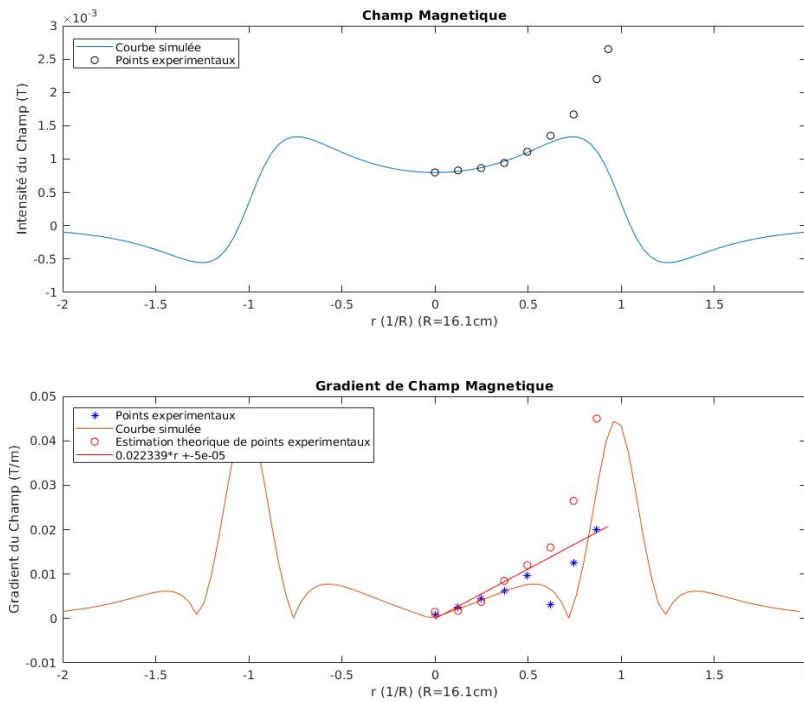


Figure 2 : Simulation du champ magnétique et de son gradient avec un écart entre les bobines de 17.3 cm, un rayon de 16.1 cm, un courant de 1.15 A et 430 spires dans chaque bobine.

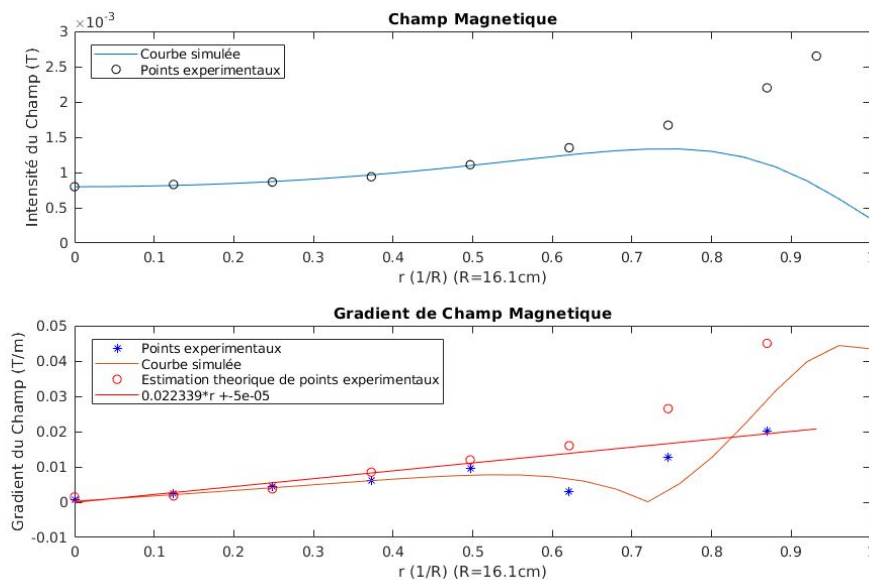
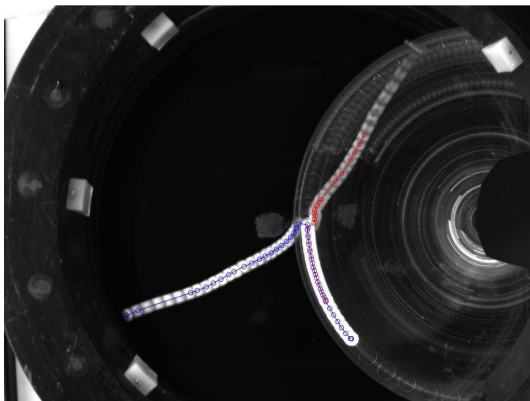


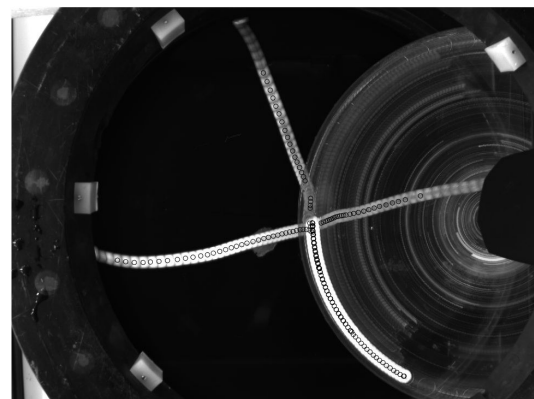
Figure 3 : Détail de la comparaison entre les mesures expérimentales et la simulation

IV) Traitement des données sur Matlab

La caméra nous fournit une séquence d'images en noir et blanc que nous analysons via un programme matlab (donné en annexe 2). Il nous permet d'obtenir la position des flotteurs au cours du temps de la même manière qu'un logiciel de pointage classique. La détection des flotteurs repose sur la commande *findcircles* qui repère tous les cercles d'un certain diamètre sur une image. Le contraste des flotteurs par rapport au fond est crucial : c'est pour cela que nous les recouvrons de peinture blanche et que nous utilisons un fond noir. On cache le haut du moteur car il possède des motifs circulaires du même diamètre que nos flotteurs et leur repérage fausserait les résultats. Le programme superpose tous les frames avec les positions des bateaux détectés dans chaque frame.



(a)



(b)

Figure 4 : Exemples de visualisation des trajectoires de bateaux avec le programme Matlab
(a) Expérience avec deux bateaux (b) Expérience avec trois bateaux

V) Annexes

1) Simulation du champ dans les bobines

SimulationBobines.m

```
%Simulation du gradient de la composante verticale du champ magnétique et comparaison avec
mesures
%dans le montage.

clc
clear all

%Mesures de la composante verticale de champ magnétique dans le montage.
%dbobines=17.3 cm
%1.15 A 31.8V
Bexp=[0.8,0.830,0.865,0.94,1.11,1.35,1.67,2.2,2.65]*10^-3; % champ magnétique [T]
d=[0,2,4,6,8,10,12,14,15]*10^-2; %distance au centre m

%estimation expérimentale du gradient de champ magnétique
gBexp=zeros(1,length(Bexp)-1);

for i=1:length(Bexp)-1
    gBexp(i)=(Bexp(i+1)-Bexp(i))/(d(i+1)-d(i));
end

np=101; %nombre de points de maillage;
ChampB=zeros(np,np,3);
z1=0; %position verticale de la bobine de bas [m]
z2=17.3*10^-2; %position verticale de la bobine de haut [m]
z=4.5*10^-2; %plan dans lequel on souhaite visualiser le champ produit [m]
R=16.1*10^-2; %rayon des bobines [m]
max=2*R;

%Calcul de la composante verticale du champ B.
for i=1:np
    for j=1:np
        x=max*(-1+2*(i-1)/(np-1));
        y=max*(-1+2*(j-1)/(np-1));
        f1= @(thp) champ(thp,z1,x,y,z);
        g= @(thp) champ(thp,z2,x,y,z);
        ChampB(i,j,:)=integral(f1,0,2*pi,'ArrayValued',true)-integral(g,0,2*pi,'ArrayValued',true);
    end
end
end
```

%estimation théorique de la dérivée avec le pas entre deux points de champ
%imposé dans le mesures.

```
idx=round((d/max+1)/2*(np-1)+1);  
gB=zeros(1,length(idx)-1);
```

```
for l=1:(length(idx)-1)  
    N=(ChampB(idx(l+1),(np+1)/2,3)-ChampB(idx(l),(np+1)/2,3));  
    D=(d(l+1)-d(l));  
    gB(1,l)=abs(N/D);
```

```
end
```

```
dN=d/R;
```

```
figure
```

```
subplot(2,1,1) %composante verticale du champ magnetique  
x=linspace(-max,max,np)/R;  
plot(x,ChampB(:,(np+1)/2,3)) %Champ simulé  
hold on  
plot(dN,Bexp,'ko'); %points experimentaux  
title('Champ Magnetique')
```

```
xlabel('r (1/R) (R=16.1cm)')  
ylabel('Intensité du Champ (T)')  
legend('Courbe simulée','Points experimentaux')  
subplot(2,1,2) %gradient de champ magnetique  
% % x=linspace(-max,max,np-1)/R;  
% plot(x(1:end-1),abs(diff(ChampB(:,(np+1)/2,3))))  
% hold on
```

```
%estimation theorique des points experimentaux de gradient de champ  
%magnetique  
plot(dN(1:end-1),gB,'b*')  
hold on
```

```
%Courbe theorique du gradient de champ magnetique  
plot(x(1:end-1),abs(diff(ChampB(:,(np+1)/2,3)))/(2*max/np))  
hold on
```

```
%points experimentaux gradient champ magnetique  
plot(dN(1:end-1),gBexp,'ro')  
hold on  
title('Gradient de Champ Magnetique')
```

```

%approximation lineaire des premieres 5 points experimentaux
p1=polyfit(d(1:5),gBexp(1:5),1);
f1=polyval(p1,d);
plot(dN,f1,'r')
hold on
title('Gradient de Champ Magnetique')

xlabel('r (1/R) (R=16.1cm)')
ylabel('Gradient du Champ (T/m)')

legend('Points experimentaux','Courbe simulée','Estimation theorique de points experimentaux',
strcat(num2str(p1(1)*R),'*r +',num2str(p1(2))))

```

Fonction champ.m

```

function [B] = champ(thp,zp,x,y,z)
%Contribution de l'element de spire localisé au point de coordonnées
%rp=(R*cos(thp),R*sin(thp),zp) à la composante verticale du champ dans le point r=(x,y,z).
mu0=12.566*10^-7;
i=1.15; %courant [A]
R=16.1*10^-2; %rayon de bobines [m]
N=430; % nb de spires dans les bobines

rho=sqrt(x^2+y^2);
if(rho<=10^-14) %forme analytique du champ au centre des bobines
    c=N*mu0*i*R*1/(4*pi)*1/((R*cos(thp)).^2+(R*sin(thp))^2+(z-zp)^2)^(3/2);
    B=c*[(z-zp)*cos(thp),(z-zp)*sin(thp),R];
else %forme analytique du champ au centre des bobines
    th=atan(y/x);
    c=N*mu0*i*R*1/(4*pi)*1/((rho*cos(th)-R*cos(thp))^2+(rho*sin(th)-R*sin(thp))^2+(z-zp)^2)^(3/2);
    B=c*[(z-zp)*cos(thp),(z-zp)*sin(thp),R-rho*cos(th-thp)];
end
end

```


2) Suivi de la position des flotteurs

TrackerBat.m

```
% Recherche des cercles de l'image et donc des bateaux
clc
clear all

nbf = 277; %nb de frames
nbb= 4; %nb de bateaux

str='6Trous4bat/'; %dossier contenant la sequence d'images

Centres=zeros(nbb,2,nbf); %matrice pour estoquer le positions des bateaux

idc=1; %compteur
total=0; %compteur

for idf=1:nbf

Image=imread(strcat(str,sprintf('Basler_acA1440-220um__40031168__20200207_164801400_%0
4d.tiff',idf)));

    if(imfindcircles(Image,[15,25])~=0)
        [centres,rayons]=imfindcircles(Image,[15,25]); % On repere les cerles de rayon compris
entre 15 et 25 pixels
        bat_vus=length(centres(:,1)); %nombre de bateaux trouvés
        Centres(1:bat_vus,:,idf)=centres(:,:);          %On estoque les coordonées des bateaux
trouvés
        idc=idc+1;
        total=total+bat_vus;
        end

end

VCentres=zeros(total,2); %Matrice pour visualisation des bateaux
k=1; %compteur
for idf=1:idc-1
    for idb=1:nbb
        if (Centres(idb,1,idf)~=0)
            VCentres(k,1)=Centres(idb,1,idf);
            VCentres(k,2)=Centres(idb,2,idf);
            k=k+1;
        end
    end
end
end
```

```
%Creation d'image avec tous les frames superposés
```

```
for idf=1:nbf
```

```
Images(:, :, idf)=imread(strcat(str, sprintf('Basler_acA1440-220um__40031168__20200207_164801400_%04d.tiff', idf)));
```

```
end
```

```
siz=size(Images(:, :, 1));
```

```
A=uint8(zeros(siz));
```

```
for i = 1 : siz(1)
```

```
    for j=1:siz(2)
```

```
        A(i,j)=max(Images(i,j,:));
```

```
    end
```

```
end
```

```
%Affichage
```

```
figure
```

```
imshow(A)
```

```
hold on
```

```
plot(VCentres(:, 1), VCentres(:, 2), 'ko')
```