

Matériel et méthodes

Rebond de billes d'hydrogel en caléfaction

Simone Le Chevère

Louise Régnier

Ombeline Taisne

Le but de notre PSE est d'étudier le rebond de billes d'hydrogel en caléfaction, c'est-à-dire au contact d'une surface très chaude. Nous avons réalisé trois expériences principales : observation macroscopique du phénomène de rebond stationnaire, mesure de l'injection d'énergie au cours du temps et observation ultrarapide des oscillations au contact de la surface chaude.

I. Première expérience : observation macroscopique du phénomène

Matériel utilisé :

Billes d'hydrogel obtenues dans le commerce (commande sur amazon) de différentes tailles et couleurs.

Billes vertes (petites): marque : Meching, "Water Beads", billes de toutes les couleurs

Billes violettes (moyennes): marque : Billes hydrogel, couleur: violet, sachet de 200g

Billes transparentes (grosses): marque: Meching, "Large water beads", boîte de 310g, 300pcs

Balance de précision

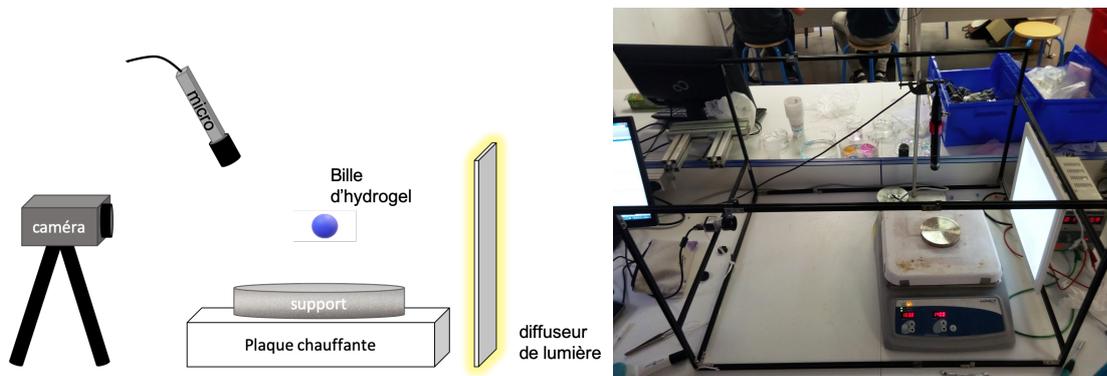
Plaque chauffante IKA C-MAG HP 10

Surface incurvée pour le rebond de la bille : en inox, rayon de courbure 61 cm.

Micro pour l'enregistrement du son

Caméra Basler acA640-750 um, objectif 8,5 mm

Diffuseur de lumière



NB : Le matériau utilisé pour la surface incurvée est de l'inox, nous avons par la suite tenté de travailler avec une plaque en aluminium, qui chauffe plus rapidement, mais nous observons parfois la bille rouler sans rebondir. Nous sommes donc revenues à de l'inox. (cf. vidéos : « caléfaction sans rebond » - sur plaque en aluminium , « caléfaction avec rebond » - sur plaque en inox)

Protocole :

Préparation des billes : On trie les billes par couleur et par masse (pesée à la balance de précision) avant de les faire gonfler, et on mesure leur diamètre. Les billes sont ensuite

lâchées à tremper dans de l'eau distillée pendant au minimum 6 heures, afin d'atteindre leur taille maximale. On les pèse après gonflement sur la balance de précision et on mesure leur diamètre, puis on les pèse à nouveau après qu'elles aient rebondi.

Mesures du rebond des billes : Après avoir réalisé une échelle à l'aide d'un réglet transparent, nous lâchons la bille au dessus du support incurvé, au centre. Nous enregistrons les images à une fréquence de 250 Hz et le son à l'aide d'un micro ; pour synchroniser les deux mesures, nous faisons un « clap » avant de lâcher la bille.

Nous faisons les expériences avec une plaque froide puis avec une plaque chaude à 310°C. Nous faisons cette expérience pour les trois tailles de billes, et nous les laissons rebondir jusqu'à ce que la bille se casse ou que sa surface s'abîme à la chaleur.

Méthodes de traitement des données :

Logiciel pour la caméra : Basler

Logiciel pour l'audio : Audacity

Caractérisation des billes : calcul du pourcentage d'eau volumique.

$$\varphi_{eau} = \frac{V_{eau}}{V_{total}} = \frac{V_{gonflé} - V_{sec}}{V_{gonflé}}$$

Le pourcentage d'eau calculé permet de comparer les modules d'Young des différentes billes, soient deux billes de module d'Young G_1 et G_2 , pour $\varphi_{eau1} > \varphi_{eau2}$ alors $G_1 > G_2$.

Pour calculer le volume, on mesure le diamètre des billes sur ImageJ à sec et une fois gonflée. Hauteur du rebond : programme Matlab nous permettant de tracer la hauteur de la bille au cours du temps. (cf Annexe Programme 1)

II. Deuxième expérience : mesure de l'injection d'énergie due à la caléfaction

Matériel et Montage :

Nous utilisons seulement les billes violettes que nous préparons de la même manière que précédemment, nous les trions avant de les faire rebondir en fonction de leur masse, afin d'avoir l'écart-type le plus faible possible entre les différentes masses avant rebond.

Nous ajoutons au montage un goulot de bouteille en plastique découpé que nous plaçons à 10,1 cm du centre de la plaque incurvée. La bille est déposée par le haut et bloquée par une barre de plexiglas retirée au moment du lancer. Nous contrôlons ainsi la hauteur de lancer initiale.

Protocole :

Même protocole que dans la première expérience, sans enregistrement du son. Nous faisons l'expérience avec les mêmes billes à froid puis à chaud afin de comparer l'injection d'énergie à chaque rebond.

Méthodes de traitement des données :

Les logiciels sont les mêmes que précédemment.

Nous faisons des programmes sur Matlab (cf Annexe Programme 2) nous permettant de tracer :

Le coefficient de restitution à froid $\varepsilon : H_{i+1} = \varepsilon^2 H_i$

L'énergie injectée entre un rebond avec et sans caléfaction: $E_{inj} = mg(H_{i+1}^{hot} - H_{i+1}^{cold})$

tel que $H_i^{hot} = H_i^{cold}$

L'énergie perdue entre deux rebonds à froid : $|E_{loss}| = |mg(\varepsilon^2 - 1)H_i|$

H_i : hauteur du ième rebond

m : masse initiale de la bille

III. Troisième expérience : étude ultrarapide du phénomène

Matériel et Montage :

Nous utilisons à nouveau uniquement les billes violettes, préparées comme dans l'expérience 2.

Nous modifions le montage :

Nous gardons la même plaque chauffante (240°C), le support n'est plus incurvé mais plat, en inox.

Afin de contrôler plus finement la hauteur de lâcher nous utilisons une seringue qui fixe la bille par un effet de ventouse.

Nous utilisons la caméra ultra-rapide Photron Fastcam Mini UX100 prêtée par le SIMM montée sur un trépied ainsi que leur diffuseur de lumière.

Protocole :

Nous étudions le phénomène qui se produit lors d'un impact sur la surface, lorsque la bille a atteint un régime stationnaire. Nous plaçons la bille à 3cm du support car il s'agit de la hauteur mesurée lorsque la bille violette atteint un régime de rebond stationnaire. Nous ne filmons qu'un seul rebond (frame rate 16 000 images/seconde) sur la plaque et nous enregistrons en même temps le son avec un micro.

Méthode de traitement des données :

Logiciel de la caméra ultra-rapide : Photon fastcam viewer

- Caractérisation des ondes de surface:

→ Calcul théorique de la fréquence des modes propres dus à l'impact:

$\lambda \sim d \sim 10^{-2} m$, avec λ la longueur d'onde, qui est égale à d , le diamètre de la bille.

Pour une onde de compression, on a la vitesse c :

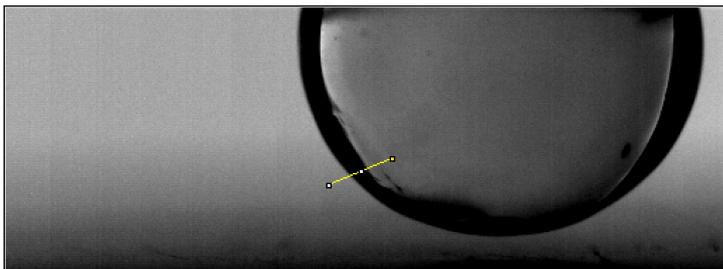
$c \sim \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ avec $E \sim 10\text{kPa}$ le module d'Young de la bille d'hydrogel, et $\rho \sim 10^3\text{kg.m}^{-3}$ la

masse volumique de l'eau

d'où: $v = \frac{c}{\lambda} \sim 10^2\text{Hz}$

→ Calcul de la fréquence des ondes visualisées à la surface de la bille:

Utilisation du logiciel de traitement d'images, ImageJ : reslice sur le bord de la bille.



Nombre de pics sur le reslice: $N \sim 15 \pm 2$

Pour 81 images à 16000 Hz, soit une durée Δt de 5,07ms.

$$v = \frac{N}{\Delta t} \sim 3 \text{ kHz}$$

On a une fréquence différente de celle des modes propres. C'est donc ici un autre phénomène qui est mis en jeu, nous comparons avec la fréquence des sons enregistrés (cf. ci-dessous, programme Matlab de la transformée de Fourier du son enregistré).

→ Calcul de la vitesse des ondes de surface sur imageJ

On pointe sur ImageJ la position d'un maximum de l'onde sur 10 images au cours du temps : on calcule ainsi les vecteurs de vitesse puis on réalise leur moyenne sur Matlab. On trouve une vitesse moyenne de $4,6 \pm 0,5$ m/s.

- Programmes Matlab pour la caractérisation des oscillations de gap :

Transformée de Fourier sur Matlab du signal sonore enregistré. (cf Annexe Programme 3)

Mesure de la fréquence des oscillations de gap à partir des images obtenues à la caméra ultra-rapide: programme Matlab calculant l'évolution de la surface de contact bille - surface au cours du temps. (cf Annexe Programme 4)

Annexe : Programmes Matlab utilisés pour le traitement des données

- Programme 1 - Trajectoire des billes

```
f=rdir('*.tiff*'); %chargement de tous les fichiers image
fqce = 250 ; %fréquence d'acquisition en im/sec
photoini=61; %première photo exploitée
photofin=8700; %dernière photo exploitée
m=photofin-photoini;
Pos_bille=zeros(m,1); %vecteur initialisé dans lequel on mettra les positions successives de
la bille
basepix=35; %position 0 en pixel
pixcm=87.7; %conversion
diambille=109/87.7; %cm
nbpixel=765; %hauteur de la photo
for i=photoini:photofin %on parcourt les images
    I=imread(f{i}); %On les lit
    I=I(:,:);
    B=im2bw(I,0.3); % binarisation (noir et blanc)
    %imshow(B);
    Vect_sum=sum(-B+1,2); %On somme les pixels sur chaque ligne
    Vect_noir_true=(Vect_sum>3); %Si plus de trois pixels par ligne sont noirs on les retient
(détection bille)
    Ind_noir=find(Vect_noir_true); %trouve les lignes contenant des pixels noirs; ind_noir(1)
correspond à la dist entre le haut de l'image et le haut de la bille
    Pos_bille(i-photoini+1)=(-Ind_noir(1)+nbpixel-basepix)/pixcm-diambille; %position de la
bille (mise à l'échelle grâce à imageJ)
    T=0:1/fqce:(photofin-photoini)/fqce; %vecteur temporel avec fréquence d'acquisition
```

```

end
[pic,t]=findpeaks(Pos_bille); %On recherche les hauteurs des rebonds successifs
plot(T,Pos_bille) %Trace l'évolution de la position de la bille
title('Evolution de la position de la bille au cours du temps')
xlabel('t (s)')
ylabel('H (cm)')
figure, plot(pic) %trace les hauteurs max de rebonds successifs
title('Hauteurs maximales des rebonds successifs')
xlabel('t (s)')
ylabel('H (cm)')

```

- Programme 2 - Energie

```

%% rebond froid et chaud
fech=250;
m=1.285; %en g
g = 9.8 ;

froid = load('Pos_bille2.mat'); %on récupère les données déjà traitées (évolution hauteur
bille)
chaud = load('Pos_bille6.mat');
froid = struct2cell(froid);
froid = cell2mat(froid) ;
chaud = struct2cell(chaud);
chaud = cell2mat(chaud) ;

chaud = chaud(1:7500,:); %on coupe à la fin du rebond
froid_add = zeros(size(chaud,1),1) ;
froid_add(1:size(froid,1),:) = froid ; %rebond à froid avec valeurs nulles dès que c'est fini
chaud=chaud(101:end);
figure(1)
subplot(2,1,1)
plot((1:size(froid,1))/fech,froid-min(froid)) %graphe du rebond à froid
title('Rebond à froid')
xlabel('t (s)')
ylabel('H (cm)')
subplot(2,1,2)
plot((1:size(chaud,1))/fech,chaud-min(chaud)) %graphe du rebond à chaud
title('Rebond à chaud')
xlabel('t (s)')
ylabel('H (cm)')

[pic_froid,t]=findpeaks(froid); %on cherche les hauteurs de chaque rebond
[pic_chaud,t]=findpeaks(chaud);

```

```

% Calcul du coeff de restitution constant à froid
figure(3)
plot(pic_froid(1:size(pic_froid,1)-7),pic_froid(2:size(pic_froid,1)-6),'*') % hauteur du pic Hi en
fonction de Hi+1 pour avoir epsilon^2
title('H[i+1] en fonction de H[i] à froid : coefficient de restitution constant')
xlabel('H(i) en cm')
ylabel('H(i+1) en cm')
p = polyfit(pic_froid(1:end-7),pic_froid(2:end-6),1); %régression linéaire
hold on
plot(pic_froid(1:size(pic_froid,1)-7),p(1)*pic_froid(1:size(pic_froid,1)-7)) %tracé de la
régression linéaire
legend('Valeurs expérimentales','regression linéaire, coeff = 0.7717')
grid on
eps2=p(1) %affiche le coefficient de restitution

```

```

% Energie perdue (notée Eloss)
Eloss=0.1*g*m*(pic_froid(1:end-1)-pic_froid(2:end)); %calcul de Eloss entre deux rebonds
successifs à froid
figure(4)
plot(pic_froid(1:end-1),Eloss,'o') %graphe de Eloss
title('Energie perdue à chaque impact sur une surface froide')
xlabel('H(i) (cm)')
ylabel('Eloss (uJ)')

```

```

% Energie injectée entre deux rebonds à chaud (Einj)
figure(5)
plot(Hi1,Einj1,'bo'); %Einj1 et Hi1 ont été créés préalablement et contiennent l'énergie
inectée pour chaque hauteur Hi de lâché
hold on
plot(Hi1,Einj1,'b');
title('Energie injectée à chaque impact sur une surface chaude')
xlabel('H(i) (cm)')
ylabel('Energie injectée (uJ)')
legend('Données expérimentales','courbe')
grid on

```

```

% Hauteur d'équilibre : au croisement entre Einj et Eloss
figure(6)
plot(Hi1,Einj1,'r+')
hold on
plot(Hi1,Einj1,'r')
hold on
plot(pic_froid(1:end-1),Eloss,'bx')
hold on
plot(pic_froid(1:end-1),Eloss,'b')
legend('E inj exp','E inj','E loss exp', 'E loss')

```

```

xlabel('H[i] (cm)')
ylabel('Energie (um)')
title('Hauteur du rebond permanent: équilibre entre énergie perdue et injectée')

```

- Programme 3 - Transformée de Fourier du son

```

data = sonviolette ; %on récupère les données exportées depuis Audacity
N = size(sonviolette,1); %nb de data à modifier
fe = 44100 ; %fréquence d'échantillonnage en Hz
T = [0:N-1]/fe ; %échelle de temps
F = linspace(0,fe,N) ; %échelle en fréquence (pour la TF)
tf = fft(data) ; %transformée de Fourier du son
subplot(2,1,1)
plot(T,data) %Graphe du son
xlabel('Temps (s)')
ylabel('Amplitude du signal')
title('Impact bille transparente')
subplot(2,1,2)
plot(F(1:floor(N/2)),abs(tf(1:floor(N/2)))) %Graphe de la transformée du son
xlabel('Fréquence (Hz)')
ylabel('Amplitude')
title('Transformée de fourier du signal')

```

- Programme 4 - Oscillations du gap : aire de contact bille/surface

```

f=rdir('* .jpg*'); %chargement de toutes les images
fech = 16000 ; %fréquence d'échantillonnage de la caméra ultrarapide
photoini = 63; %première photo exploitée
photofin = 147 ; %dernière photo exploitée
Aire = zeros(1,photofin-photoini) ; %initialisation du vecteur de l'aire de contact bille/plaque
pxmm = 98.7 ; %conversion px-cm
for i=1:photofin
    I=imread(f{i}); %on lit les images successives
    %I=I(100:512,1:512); %si on prend une seule partie de l'image
    B=im2bw(I,0.05); %binarisation
    %imshow(B);
    Vect_sum = sum(-B+1,2); %on somme les pixels d'une même ligne
    A = Vect_sum(250) ; %REGARDER SUR L IMAGE LA HAUTEUR DE CONTACT !!!!
    if i>=photoini
        if i <= photofin
            Aire(i-photoini+1) = pi*((A/2)^2)/pxmm ; %calcul de l'aire de contact à chaque instant
        end
    end
end
end
T=0:1/fech:(photofin-photoini)/fech; %vecteur temps
plot(T,Aire) %tracé de l'aire de contact au cours du temps

```

```
title('Oscillations du gap : Evolution de la surface de contact lors d`un rebond')  
xlabel('t(s)')  
ylabel('Aire de contact (mm2)')
```