

Les crêpes : cuisson versus étalement

Méthodes et protocoles

I. Recette de crêpe

La recette de crêpe utilisée pour l'ensemble des expériences est une recette simplifiée composée de lait et de farine :

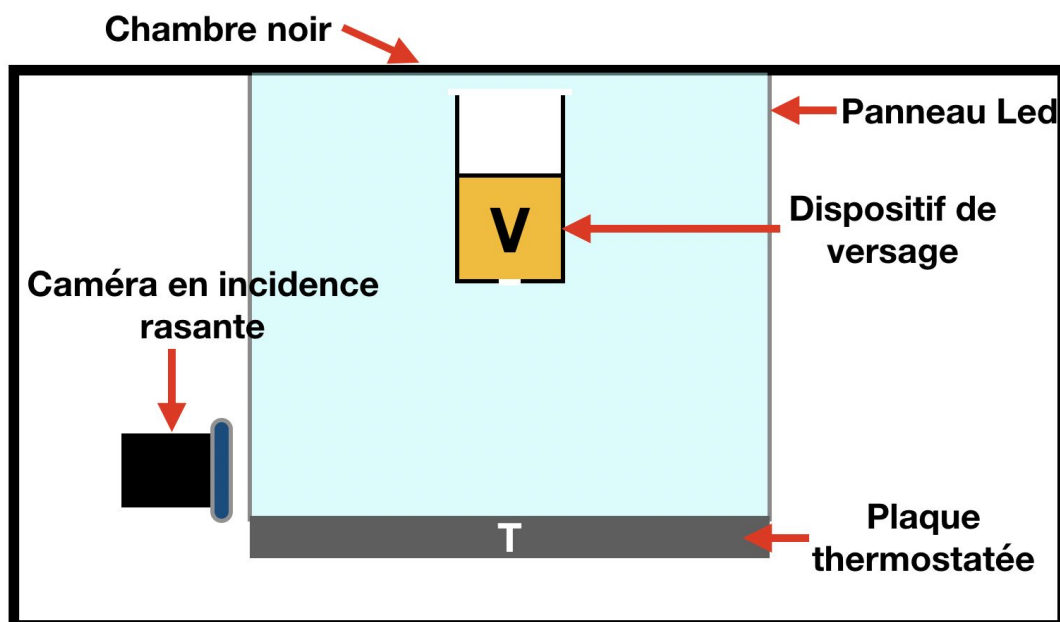
- Farine de blé "fluide" Type 45, marque Casino par paquet de 1Kg.
- Lait demi-écrémé en brique de 1L, marque Les 30 fermes de Cant'Avey'Lot.

Les proportions des ingrédients ont été gardées constantes pour toutes les expériences, sauf pour celle impliquant une variation de la fraction massique en lait.

Le rapport massique usuel lait sur farine est $\frac{m_{\text{lait}}}{m_{\text{farine}}} = 1,93$.

La pesée des ingrédients se fait avec une balance de précision au gramme près. La pâte est faite par mélange des deux ingrédients dans un saladier au fouet.

II. Dispositifs expérimentaux



Dispositif expérimental à t=0s
Maîtrise de la Température et du Volume

Matériel utilisé :

- Plaque chauffante thermostatée marque IKA; température de 50  C    500  C; dimension plaque 260mm*260mm. La plaque chauffante est recouverte d'une taule d'acier provenant de l'atelier de l'ESPCI de 260mm*260mm*6mm. Plus d'informations sur le site:
<https://www.milian.com/frontoffice/article/250175>
- Caméra noir et blanc de la marque Basler, avec objectif :
<https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/area-scan-cameras/ace2/#productline=ace2basic>
- Une seringue de 150mL sans piston avec trou de 8mm et capuchon amovible en carton fabriqué par notre groupe.
- Une potence avec une noix et une pince.
- Un Boy.
- Du ruban adhésif en caoutchouc.
- Un générateur continu 18W.
- Tableau led lumineux 30cm*30cm 18W:
<https://www.ledkia.com/fr/acheter-panneaux-led/606-panneau-led-slim-30x30cm-18w-cadre-argente.html>
- Câbles de connection.
- Structure "cage" en barre d'aluminium 40cm*40cm*60cm recouverte de tissu noir opaque à la lumière.

Les logiciels utilisés :

- Pylon viewer logiciel Basler :
<https://www.baslerweb.com/en/products/software/pylon-windows/>
- Matlab
- ImageJ

Explication et détail du montage :

Le montage s'organise autour de la plaque chauffante thermostatée. La caméra est placée en incidence rasante et selon la diagonale de la plaque, elle permet alors de réaliser une prise de vue latérale de la crêpe. La mise au point de la caméra est faite sur la zone où se dépose la crêpe. La seringue avec son capuchon forme un dispositif qui permet de maîtriser le versage de la pâte à crêpes sur la plaque. Cette seringue est remplie de pâte à crêpes à l'aide d'une autre seringue graduée (tous les 2 mL), ce qui permet de maîtriser le volume de pâte à déposer. La structure métallique et le voile noir opaque sont nécessaires pour isoler de la lumière ambiante parasite qui rend le traitement des images impossible (voir la section

ImageJ). La crêpe est éclairée latéralement par le panneau Led de manière à faire ressortir le contraste de la crêpe par rapport au milieu ambiant.

Note sur l'acquisition d'images avec le logiciel Pylon Viewer :

Dans le logiciel Pylon Viewer, on sélectionne tout d'abord la caméra souhaitée. On règle ensuite les paramètres d'enregistrement (recording settings) : on choisit le fichier où enregistrer les images à la fin de l'acquisition, et on règle l'enregistrement d'un frame toutes les 100 millisecondes. On règle ensuite les autres paramètres d'acquisition : on règle le temps d'exposition sur 300 000 microsecondes, ce qui peut être amené à varier si les conditions d'éclairage ambiant changent suffisamment. Enfin, on règle la fréquence d'acquisition des frames (acquisition frame rate)    10 Hz. Après l'enregistrement souhaité, on obtient la séquence d'images .tiff dans le dossier sélectionné.

Protocole :

Allumer le panneau Led. Déposer la quantité de pâte dans la seringue suspendue et bouch  e. Lancer l'acquisition de la séquence d'images avec les paramètres détaillés ci-dessus, et enlever le capuchon tout en isolant bien la plaque de la lumière extérieure avec le voile opaque. Stopper l'acquisition au moment voulu, c'  st à dire lorsqu'il n'y a plus d'écoulement visible.

III. Mesure du coefficient de diffusion de la pâte à crêpe

Pour mesurer le coefficient de diffusion de la pâte à crêpe à une température donnée, nous avons utilisé le montage décrit ci-dessus avec la plaque chauffante thermostatée. Nous avons aussi eu besoin de matériel additionnel :

- Cylindres de rayon intérieur 5 cm et de hauteur environ 5 cm en métal provenant de l'atelier de l'ESPCI.
- Une paire de gant protégeant de la chaleur.
- Une spatule métallique, comme celles utilisées en maçonnerie.
- Un pied à coulisse de précision 0.1 mm.
- Un chronomètre.
- Une seringue de 150mL gradué de 5mL en 5mL.

Protocole :

Préchauffer la plaque de cuisson à la température souhaitée. Placer un tube métallique sur la plaque, la section circulaire devant être apposée sur la plaque. Faire couler depuis la seringue le volume de pâte choisi dans le tube et déclencher

le chronomètre. Nous avons utilisé des volumes de 5 à 15 ml selon les épaisseurs souhaitées. Il faut que l'opérateur veille à mettre assez de pâte pour qu'elle ne cuise pas totalement pendant le temps de la mesure. Il faut donc garder une marge de pâte de crêpe qui restera non cuite. Une fois le temps de mesure souhaité atteint, retirer le tube et la pâte de la plaque de cuisson à l'aide d'une spatule et des gants. Démouler la pâte du tube et enlever l'exc  dent de pâte non cuite sur le dessus à l'aide de la spatule. Mesurer l'épaisseur de pâte cuite au centre à l'aide du pied à coulisse. Recommencer cette expérience autant de fois que le nombre de mesures nécessaires en faisant varier le temps de cuisson.

Tracer l'épaisseur en fonction du temps et en déduire le coefficient de diffusion thermique de la pâte à la température de cuisson où on travaille, à l'aide de la relation $e = \sqrt{Dt}$, où e est l'épaisseur de crêpe cuite, D le coefficient recherché et t le temps de cuisson de la crêpe.

IV. Traitement des images

Préparation des images sous ImageJ :

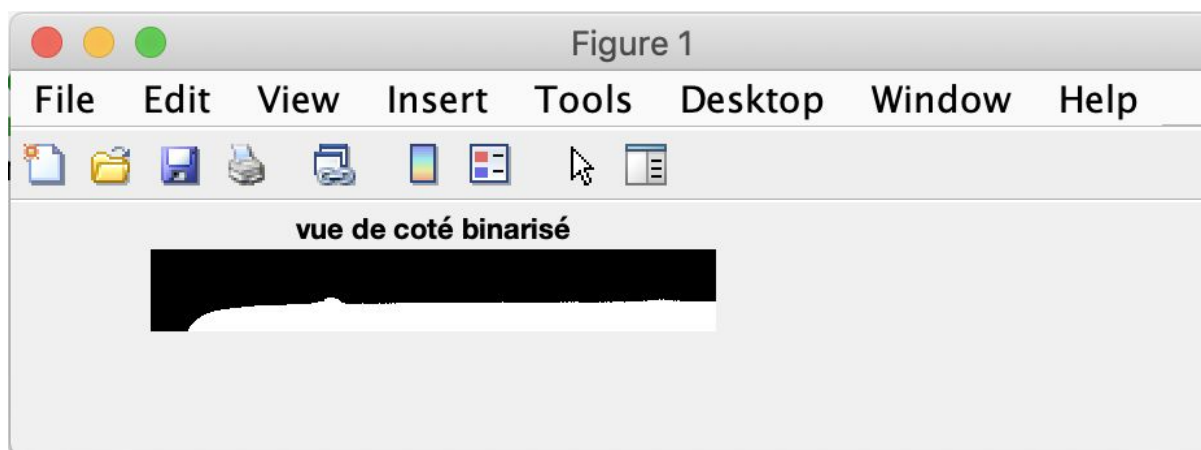
On commence par charger la séquence d'images désirées dans le logiciel ImageJ. On fait ensuite défiler la séquence d'images pour vérifier qu'il n'y pas de souci (images manquantes ou rangées dans le mauvais ordre par exemple). On mesure ensuite l'angle entre les deux bords opposés de la crêpe : si cet angle est diff  rent de zéro, l'image de la crêpe n'est pas parfaitement horizontale, et on corrige alors ce défaut en tournant toutes les images de l'angle nécessaire. On se place sur la dernière image de la séquence dans la suite. On note le numéro des pixels marquant les bords gauche et droit de la crêpe sur l'image. Cela permet d'une part de calculer le numéro du pixel situé au centre de la crêpe, et aussi de calculer le pixel à partir duquel on rogne la séquence d'images. En effet, pour éviter des bugs dans le programme Matlab il faut rogner le centre des images, où on voit la pâte à crêpes couler au début de l'expérience, ce qui fausse alors le traitement d'images Matlab. Pour résoudre ce problème, nous avons décidé de garder uniquement la partie gauche des images, plus précisément 45% de la crêpe totale en gardant en mémoire les coordonnées du centre de la crêpe. On sélectionne donc la zone voulue à l'aide de l'outil rectangle et on rogne ensuite l'ensemble des images. Enfin, on enregistre la séquence d'images traitées au format .tiff.

Binarisation des images et mesure de rayon sous Matlab (Voir annexe 1):

Les séquences d'images redimensionnées sous ImageJ ont ensuite été traitées sous Matlab. Pour effectuer des mesures quantitatives standardisées de rayons

nous avons fait le choix de binariser les séquences d'images. Le code de binarisation prend en entrée la séquence d'images traitées sous ImageJ, et les coordonnées des pixels marquant le début et le centre de la crêpe (ce dernier n'étant pas visible sur l'image), issus de l'analyse sous imageJ. La binarisation se fait image par image avec la commande de Matlab `im2bw`, pour laquelle on choisit le seuil de binarisation le plus adaptée à la séquence d'image considérée, ce qui nécessite un contrôle manuel. La binarisation effectuée, on peut mesurer le rayon de la crêpe via le comptage des pixels sur une ligne horizontale de l'image judicieusement choisie sur l'axe d'élongation de la crêpe. On stocke toutes les mesures dans une liste de rayons, classés selon un ordre de temps croissant.

La fréquence d'échantillonnage, les coordonnées du pixel marquant la limite de rognage des images traitées sous imageJ, les coordonnées du pixel du centre de la crêpe, le rapport de conversion entre pixels et mètres, ainsi que la liste des rayons sont enregistrés en temps que variables Matlab sous une variable principale qui référence la mesure. Toutes ces données seront exploitées dans les autres codes d'exploitation théorique ou expérimentale de nos données.



Fenêtre d'affichage d'un profil de crêpe binarisé

Modélisation du rayon de la crêpe sans cuisson (voir annexe 2):

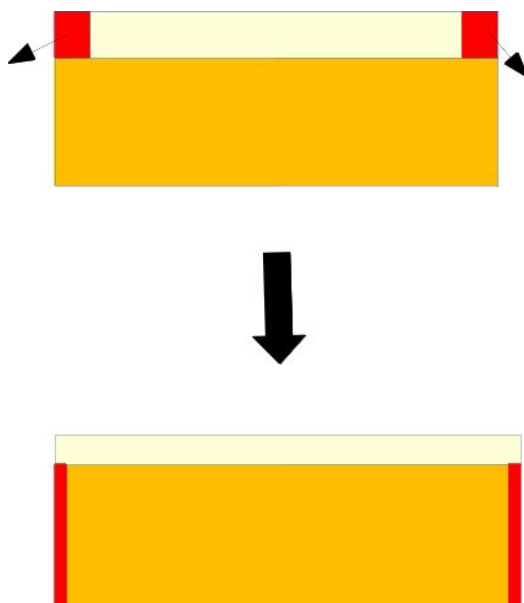
Pour modéliser l'écoulement de la crêpe sans cuisson, nous avons calculé analytiquement (voir annexe) l'expression du rayon de la crêpe en fonction du temps. Dans un code Matlab, nous avons tracé les rayons théoriques ainsi calculés et les rayons expérimentaux à température ambiante ($T^\circ = 25^\circ\text{C}$ environ).

Dans les calculs nous avons pris une masse volumique pour la pâte de l'ordre de celle de l'eau ($1000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Cette valeur est cohérente avec les constatations expérimentales. Toutes les unités des autres grandeurs physiques implémentées dans le code sont données en unité du système international.

V. Modélisation de l'écoulement de la pâte avec cuisson

Cette section présente l'ébauche de traitement des phénomènes conjoints de cuisson et d'étalement impliqués dans la formation d'une crêpe. Ce modèle est imparfait et plus qualitatif que quantitatif. Cette approche permet de valider l'hypothèse d'une cuisson diffusive qui limite l'étalement gravitaire décrit dans la modélisation de la crêpe sans cuisson.

Pour cette modélisation nous sommes partis de l'hypothèse que la cuisson des crêpes est un phénomène diffusif, et que l'étalement est régi par la gravité uniquement, et donc une chute de matière au cours du temps.



Schéma de la modélisation de l'écoulement de la pâte avec cuisson

La première partie du code est l'initialisation de notre matrice représentant la crêpe. On attribue trois valeurs possibles aux éléments de la matrice : 0 pour pas de crêpe, 1 pour de la crêpe cuite, et 2 pour de la crêpe non cuite. On initialise la crêpe comme étant une colonne de pâte non cuite, avec une base cuite sur une fine épaisseur. Sur le schéma ci-dessus, l'orange représente la pâte à crêpe cuite, le jaune pâle la pâte non cuite et le rouge le volume de pâte tombant sous l'effet de la gravité lors d'une itération.

On définit un petit volume conservé tout au long de la modélisation, qui est le petit volume de pâte non cuite (en pixels noté p) qui tombe sur la plaque par itération, sur un intervalle de temps δt qui est aussi fixé. Ce petit volume est représenté en rouge dans le schéma ci-dessus.

On entre ensuite dans une boucle d'itération où l'on fait tomber dans un premier lieu le volume p de pixel de chaque côté de la crêpe, de telle manière que ce volume

reste constant d'une part et que ce petit volume soit de même épaisseur que la crêpe déjà cuite d'autre part. Puis on répartit les pixels correspondant à la pâte non cuite sur le sommet de la crêpe sur toute la nouvelle largeur de la crêpe. Enfin, on augmente l'épaisseur de crêpe cuite par diffusion sur le temps d'itération t . On recommence ces opérations tant qu'il reste de la pâte non cuite.

Les résultats fournis par cette modélisation n'ont aucune valeur quantitative car le choix du petit volume p est arbitraire. Cependant, on peut apprécier la forme obtenue pour le tracé du rayon de la crêpe au cours du temps, qui est comparé aux valeurs expérimentales. Pour rendre la comparaison valable, il faut normaliser la liste des rayons théoriques obtenus via la modélisation par le rayon final expérimental mesuré. La forme obtenue pour cette courbe théorique est proche de celle obtenue expérimentalement, on peut donc avancer que l'approche par compétition entre chute gravitaire et cuisson par diffusion semble être justifiée.

Lors de travaux ultérieurs, on pourrait sur la base de l'étude de l'écoulement de la pâte non cuite, donner une valeur physique aux petits volumes de pâtes de ce modèle afin de lui donner plus de sens d'un point de vue quantitatif.

27/04/20 13:26

untitled2

1 of 2

```

clear all
close all
clc

% Calcul du rayon on a la position du d ebut de notre s equence et la position du
pixel de centre on remonte donc au rayon.
PD = 811;% position en pixel du bord de la s election donn ee par Image J
PC = 860;% position du pixel de centre de la cr epe donn ee par Image J --> pour
calcul de rayon.
nb = 88*10^2; % le nombre de pixel par m etre.
freqech = 10; % la fr equence d'echantillonnage

myFoldercote =
'/Users/lucasbidoire/Desktop/matlab/codes_fonctionnel/08_01_2020/20mL_Tamb_essai1'; %
redirige vers le fichier image
% controle position fichier
if ~isdir(myFoldercote)
    errorMessage = sprintf('Error: The following folder does not exist:\n%s',
myFoldercote);
    uiwait(warndlg(errorMessage));
    return;
end
theFilescote = dir(myFoldercote);
nb_image = length(theFilescote);

for k = 6 : floor(nb_image) % dans la structure matlab theFilesCote il y a des
 el ements  a ne pas prendre en compte.
    % conversion du fichier image en liste sequence de matrices
    baseFileNameCote = theFilescote(k).name;
    fullFileNameCote = fullfile(myFoldercote, baseFileNameCote);
    imageArraycote = imread(fullFileNameCote); % le tableau avec les images
    % binarisation de l'image
    BWcote = im2bw(imageArraycote,0.55); % 0.55 seuil de binarisation choisit
pour cet exemple

    profilcote1(k,:)=sum(BWcote); % on somme le nombre de pixels éclairées par
colonne, pour chaque image

    imshow(BWcote); % Display image.
    title('vue de cotée binarisée');
    drawnow; % force l'image à s'afficher au fur et à mesure.
end

% stockage des grandeurs dans des variables aux noms sp ecifiques au
% cas consid er e
profil20mL_Tamb_essai1 = profilcote1;
PD20mL_Tamb_essai1 = PD;
PC20mL_Tamb_essai1 = PC;
nb20mL_Tamb_essai1 = nb;
freqech20mL_Tamb_essai1 = freqech;

% Stockage de ces variables dans un fichier associée au test
% consid er e.
nb_image_c = nb_image;
save('profil20mL_Tamb_essai1.mat','profil20mL_Tamb_essai1');
save('profil20mL_Tamb_essai1.mat','-append','PD20mL_Tamb_essai1');
save('profil20mL_Tamb_essai1.mat','-append','PC20mL_Tamb_essai1');
save('profil20mL_Tamb_essai1.mat','-append','nb20mL_Tamb_essai1');
save('profil20mL_Tamb_essai1.mat','-append','freqech20mL_Tamb_essai1');

```

Annexe 1 : Code de binarisation commentée.

27/04/20 13:33 /Users/lucasbid.../MODELISATIO_R8_FINAL.m 1 of 1

```

clear all
close all
clc

load('20mL_Tamb_essai1.mat');
load('20mL_Tamb_essai2.mat');
load('20mL_T50C_essai2.mat');
load('20mL_T100C_essai1.mat');
load('20mL_T200C_essai1.mat');
load('20mL_T75C_essai1.mat');
load('20mL_T125C_essai1.mat');
load('20mL_T175C_essai1.mat');

pas = 0.01; % pas de temps utilisée pour les calculs de mod elisation en seconde
limite = 184; % Limite de temps en seconde

rho = 10^3; % masse volumique de la p ate
g = 9.81; % acc el eration de la peseteur
visc = 0.4; % viscosit e dynamique de la pate
vol = 20*10^(-6); % volume de p ate d epos e

T=[0:pas:limite]; % liste des temps
R_8= ((rho*g*4*(vol^3))/(visc * pi^3 * log(10)))*T; % calcul du rayon th eorique  a la
puissance 8
R = (R_8).^(1/8); % calcul de R th eorique

figure(5) % la mod elisation

% deux r esultats exp erimentaux
plot(axeT_2_Tamb,smooth((A_2_Tamb)'), 'LineWidth',5, 'color', [0,1,0]);
hold on
plot(axeT_1_Tamb,smooth((A_1_Tamb)'), 'LineWidth',5, 'color', [0,0,1]);
% le r esultat de la mod elisation
hold on
plot(T,R, 'LineWidth',5, 'color', [1,0,0]);

title('Rayon de la cr epe en fonction du temps  a temp erature ambiante, comparée avec la
mod elisation');
xlabel('temps en secondes');
ylabel('Rayon en m etres');

% comande de mise en page...
set(gca, 'FontSize',25)
lgd = legend('Tamb-exp1', 'Tamb-exp2', 'Mod elisation  a Tamb');
lgd.FontSize = 35;

```

Annexe 2 : Code mod elisation sans cuisson commentée.

27/04/20 13:49 /Users/luc.../MODELISATION_Avec_Cuisson.m 1 of 2

```

clear all
close all
clc

% Initialisation de la matrice de modélisation
A = zeros(1000,3000); % création de la matrice de modélisation
lb = 1400; %pixel de gauche de la crêpe
lh = 1600; %pixel de droite de la crêpe
HNC = 600; % hauteur non cuite
HC = 50; % hauteur cuite
hc0 = HC;

% on insère une colonne de pâte dont la base est déjà cuite et la partie
% supérieur crue
A(1:HC,lb:lh) = 1; % base de la crêpe déjà cuite
A(HC+1:HNC,lb:lh) = 2; % partie supérieur de la pâte pas encore cuite
%0 = pas de crepe . 1 = crpe cuite . 2 = crepe pas cuite

p = 20; % paramètre p variable du volume --> Petit volume qui tombe par gravité à
chaque itération
t = 0.01; %increment de temps en seconde

D = 0.24; % coefficient de diffusion
T = [0]; % matrice des temps d'écoulement initialisé
L = 0; % largeur sur le bord de crêpe où répartir la pâte
H = [HNC]; % matrice initialisé des hauteurs de crêpe
R = [(lh-lb)/2]; % matrice initialisé de rayon
i = 1;

% affichage de la crêpe initialisé (vue 2D section)
imagesc(imrotate(A,180));
drawnow;

%% Début de la modélisation dynamique

while HC < HNC && lb>50 %tant qu'il y a une certaine hauteur de pate non cuite on  
continue

    %comptage des petit pixels à répartir.
    NBC = (HNC-(HC+1))*p;

    %repartition des pixels sur le cote
    L = NBC/HC; % on a un pave droit ou repartir les cases de hauteur HC et de largeur  
L de chaque cote !!!

    % modification de la matrice --> On cuit ces éléments tombé sur la
    % plaque
    A(1:HC,(lb-L):lb) = 1;
    A(1:HC,lh:(lh+L)) = 1;

    %repartition des pixels sur le dessus de pate non cuite
    NBPC = (HNC-(HC+1))*((lh-p)-(lb+p)+1); % nombre de pixel à repartir
    LNC = NBPC/((lh+L)-(lb-L)+1); % hauteur du pave droit

    % modification de la matrice
    A(HC:(HC+LNC),(lb-L):(lh+L)) = 2; % pate crue
    A((HC+LNC+1):1000,1:3000) = 0; % plus de crêpe

    % Cuisson par diffusion
    A(1:(hc0 + sqrt(D*T(i))),(lb-L):(lh+L)) = 1; % ce qui est tombé sur les cotes cuit  

```

Annexe 3-a : Code modélisation avec cuisson comment  .

27/04/20 13:49 /Users/luc.../MODELISATION_Avec_Cuisson.m 2 of 2

directement + diffusion de la cuisson sur la hauteur caractéristique de diffusion.

```
% affichage de la crêpe modélisé (vue 2D section)
imagesc(imrotate(A,180));
drawnow;

% modification des grandeurs pour prochaine itération
lb = lb-L;
lh = lh+L;
HC = hc0+sqrt(D*T(i));
HNC = HC+LNC;
i = i + 1;
T(i) = T(i-1)+t;
H(i) = HNC;
R(i) = (lh-lb)/2;
end

figure(2)
plot(T,R);
```

Annexe 3-b : (Suite) Code modélisation avec cuisson comment  .