

# Influence de l'humidité relative sur l'étalement, le motif final et l'adhésion d'une goutte de sang séchée

Wassim Bou Zeid, David Brutin

Laboratoire IUSTI, UMR 7343 CNRS, Aix-Marseille université, 5 rue Enrico Fermi, 13453 Marseille cedex, France

\*(auteur correspondant : [wassim.bouzeid@polytech.univ-mrs.fr](mailto:wassim.bouzeid@polytech.univ-mrs.fr))

**Résumé** - L'évaporation d'une goutte chargée en particules sur un substrat fait l'objet depuis peu de nombreuses études dû principalement aux nombreuses applications qui en découlent notamment dans le domaine du biomédical et criminel. Jusqu'à présent, ces études se sont intéressées à la formation du motif complexe observé à la fin du processus d'évaporation. Ce travail expérimental vise à étudier l'influence de l'humidité relative sur l'étalement ainsi que sur le motif final observé lors du séchage d'une goutte de sang. L'humidité relative varie entre 13.5% et 78.0%. Des gouttes de sang de même volume sont déposées sur des substrats de verre. Une caméra en vue de dessus permet de suivre l'évolution du régime de séchage (dépôt, gélification et fracturation). Dans cette étude, nous montrons que l'humidité relative influence l'angle de contact, le diamètre de mouillage et par conséquent le motif final observé à la fin du processus d'évaporation. Un bon accord a été observé entre nos résultats réalisés sur les gouttes de sang et le travail expérimental de Chhasatia et al. [App. Phys. L 97, 231909 (2010)] réalisé avec des goutte de particules de 1.1 $\mu$ m de diamètre. De plus, nos mesures expérimentales sont en bon accord avec un modèle diffusif pur dont le diamètre de mouillage et l'angle de contact sont fonction de l'humidité relative. Nos résultats montrent aussi que la transition entre la phase d'évaporation purement convective et la phase de gélification se produit à 65% de la durée totale de séchage quelque soit l'humidité relative.

## Nomenclature

HR	humidité relative, %	$P_a$	pression, bar
$D_{diff}$	coefficient de diffusion, $m^2/s$	$D_0$	diamètre, mm
$\Theta_0$	angle de contact initial, degré	$R_0$	rayon de mouillage, mm
$T_a$	température ambiante, °C	$\delta$	erreur absolue, %
$m_0$	masse initial, mg	$C_v$	concentration de vapeur, $kg/m^3$
$J_0$	débit d'évaporation initial, $\mu g/s$	$P_{cap}$	pression capillaire, Pa
$t_F$	temps d'évaporation final, sec	$\gamma_{(s,a)}$	tension de surface solvant/air, m.s-1
R	constante des gaz parfaits, $J.kg^{-1}.k^{-1}$	$r_p$	rayon du pore, mm
$J_{blood}$	débit d'évaporation théorique, $\mu g/s$	$\alpha=10$	constante géométrique

## 1. Introduction

Les motifs observés après l'évaporation totale d'une goutte de fluides biologiques ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche (voir tab.1) dû principalement aux nombreuses applications qui en découlent : le séquençage ADN [1], les technologies d'impressions et de dépôts [2,3], la fabrication de nouveaux systèmes électroniques et optiques [4,5], les tests médicaux [6,7,8], le dépistage des drogues [9], la bio-stabilisation [10], et même dans les investigations criminelles. Cependant, différents motifs peuvent être obtenus suite à l'évaporation d'une goutte de suspension de particules: un motif annulaire [11], un motif structuré en cellules polygonales [12], hexagonales [13] ou un dépôt uniforme [14]. Lorsqu'une goutte de suspension de

particules s'évapore sur un substrat solide, les particules sont accumulées près de la ligne de contact amenant à la formation d'un motif en forme d'anneau « coffee stain effect ». La formation de ce motif est expliquée par l'accrochage de la ligne de contact due aux particules présents en suspension dans le liquide et aux mouvement des particules et du liquide vers la ligne de contact afin de compenser la perte de liquide qui s'évapore plus rapidement à proximité de la ligne de contact [11]. En effet, les phénomènes influençant la formation de motifs dépend de plusieurs paramètres tels que les propriétés physico-chimiques du substrat [15], l'étalement [16], le flux d'évaporation interne (convection Marangoni [12]), les conditions de séchage (température [17], l'HR de l'environnement d'évaporation [18], la vitesse d'air [19]), l'ajout d'un surfactant [20,21] et le type de particules (taille [22], composition chimique [23]). Des études approfondies concernant l'évaporation de gouttes ont été menées pour élucider les mécanismes fondamentaux influençant la formation de motifs notamment l'effet des conditions de séchage. Récemment, David et al. [24] ont mis en évidence que pour une même HR, la dynamique d'évaporation et le motif obtenu d'une goutte de sang sont influencés par la mouillabilité du substrat. Ainsi, différents angles de contact sont obtenus en utilisant différents types de substrats. De plus, le motif final obtenu est lié à la structure de l'arrangement des particules induit par un changement de la vitesse du flux au sein de la goutte [25] et au flux d'écoulement interne. Très peu d'études présentes dans la littérature se sont intéressés à l'évaporation de gouttes sessiles de fluides biologiques [7,26,27]. Le sang total a rarement été étudié en tant que fluide cible pour l'évaporation d'une goutte sessile, bien que des gouttes de sérum ont générés plusieurs publications. La compréhension des conditions de séchage sur la dynamique d'évaporation et sur la formation de motifs d'un fluide biologique dans des conditions atmosphériques contrôlées est importante pour la caractérisation morphologique. Chhastia et al. [28] ont montré que la région de dépôt de particules et le motif d'une goutte de suspension colloïdales varie d'une façon significative avec l'HR. Leur analyse a montré que l'augmentation de l'HR induit une diminution d'angle de contact et une augmentation d'étalement de la goutte, amenant à une grande région de dépôt de particules de la goutte avec une ligne triple accroché. Les expériences réalisées avec des différentes valeurs d'humidité vont influencées directement le taux d'évaporation de la goutte, i.e., une goutte s'évapore plus vite pour des faibles valeurs d'HR. Nous étudions ici l'influence de l'HR sur l'étalement d'une goutte de sang et sur l'évolution de motifs de séchage final.

Références auteurs	Année	Fluides biologiques	Type du substrat	Observations
Yakhno [6]	2008	Sérum sanguin	Verre	Cristallisation du sel et transition vitreuse de protéines
Yakhno [29]	2012	Eau	Verre	Influence thermographique à l'interface d'une goutte
Tarasevich [30]	2011	Sérum albumine	Verre	dynamique de forme et de la concentration
Brutin [7]	2011	Sang humain	Verre	Formation de motifs d'une goutte de sang séchée
Zhuang [27]	1982	Sérum sanguin	Papier Filtre	Utilisation de sérum séché sur du papier filtre
Tarasevich [31]	2007	Fluides biologiques	-	Modélisation avec la diffusion et la convection
Shabalin [32]	2007	Sérum sanguin	Verre	Différents motifs témoignant différentes maladies
Smalyukh [33]	2006	Solution DNA	Verre	Dépôts annulaires formées par le séchage d'une d'ADN
Annarelli [34]	2001	Sérum albumine bovine	Verre	Formation des fractures dans des gouttes séchées

Tableau 1 : Littérature concernant l'évaporation des gouttes de fluides biologiques

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Expériences

L'expérience consiste à étudier l'évaporation naturelle d'une goutte de sang reposant sur un substrat de verre « ultra-propre » sous atmosphère contrôlée en HR. Le suivi de l'évolution de la masse s'effectue avec une balance numérique de haute précision avec une résolution de 10  $\mu\text{g}$  et une fréquence d'acquisition de 10 Hz (Mettler Toledo XS 105). Simultanément, une visualisation de dessus est réalisée à l'aide d'un appareil photo numérique (Canon EOS 7D) couplé à un objectif permettant jusqu'à un grossissement x5. Cet appareil photo (résolution de 5184 x 3456 pixels sur une surface de 22,3 x 14,9 mm<sup>2</sup>) permet de prendre des images toutes les 10 secondes afin de suivre l'évolution des paramètres géométriques de la goutte au cours de l'évaporation (i.e.,  $R_0$  et  $\Theta_0$ ). Ensuite, les images sont enregistrées et traitées avec un logiciel de traitement d'image. L'évaporation s'effectue dans une boîte parallélépipédique de dimension 100 x 100 x 150 mm<sup>3</sup> (Fig.1). Cette boîte reste fermée et la régulation d'humidité est éteinte lors de l'expérience afin d'isoler le processus d'évaporation de toute perturbation extérieure. L'HR à l'intérieur de la boîte à gants est contrôlée en injectant soit de l'air sec ou humide, et une gamme d'HR entre 13.5% à 78.0% est obtenue lors des expériences. Les détails expérimentales sont donnés dans le tableau 2. Une goutte de sang de volume 14.2  $\mu\text{l}$  est injectée, au moyen d'une micropipette numérique (EPPENDORF Stream) et déposée lentement sur un substrat de verre. La goutte de sang s'évapore naturellement dans un atmosphère composé d'air à une température maintenue  $T_a = 23.8^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$  et une pression  $P_a = 1$  bar. Ces conditions ambiantes sont mesurées à l'aide d'une station météorologique. Même volume est utilisé pour toutes les gouttes de sang afin d'étudier l'influence de l'HR sur les paramètres géométriques (i.e.,  $\Theta_0$  et  $D_0$ ). Afin de quantifier l'augmentation de la région de dépôt,  $D_0$  est calculé en utilisant IMAGEJ.

HR %	$\delta\text{HR}$ %	$m_0$ mg	$\delta m_0$ %	$D_0$ mm	$\delta D_0$ %	$\Theta_0$ degré	$\delta\Theta_0$ %	$J_0$ $\mu\text{g/s}$	$\delta J_0$ %
13.5	0.5	13.7	2.2	7.6	0.6	17.2	0.9	6.3	0.6
19.0	1.0	14.7	1.5	8.0	0.6	16.1	1.0	7.1	0.7
31.0	1.0	15.0	1.8	8.0	0.6	16.5	1.1	7.0	0.8
34.5	3.5	14.2	1.9	8.2	0.6	14.5	1.2	5.6	0.3
50.0	4.0	15.0	2.8	9.3	0.5	10.3	1.6	5.1	0.9
61.5	3.5	14.5	1.9	9.9	0.5	8.3	1.2	4.2	0.5
66.5	1.5	14.9	2.6	9.9	0.5	8.7	1.5	4.3	0.5
78.0	7.0	15.1	2.0	11.9	0.6	5.1	1.2	3.5	0.9

Tableau 2: Détails expérimentales de l'évaporation d'une goutte de sang de volume  $V=14.2 \mu\text{l} \pm 1.0 \%$  sur un substrat de verre « ultra-propre » à différentes humidité relative.

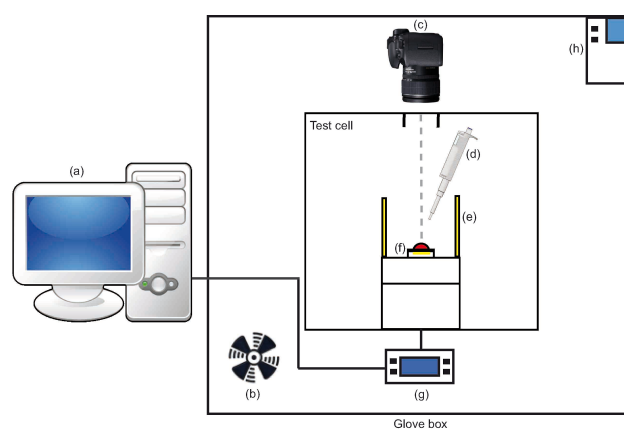


Figure 1 : Equipement utilisé pour l'évaporation d'une goutte de sang sessile déposée sur un substrat de verre: un ordinateur (a), un ventilateur pour recycler l'air à l'intérieur de la boîte (avant le démarrage de l'expérience) (b), un appareil photo numérique EOS 7 HD (c), une micropipette numérique (d), deux sources de lumière froide (e), un substrat de verre (f), une balance numérique (g) et un régulateur d'humidité (h).

## 2.2. Incertitudes

La précision des valeurs d'HR mesurées dans la boîte à gants est  $\delta=0.5\%$ . Comme la régulation d'humidité est éteinte au début de l'expérience afin d'éviter la convection interne dans la boîte à gants, les valeurs d'HR, peuvent être susceptible de varier à la fin du processus d'évaporation, ainsi, chaque valeur d'HR correspond à la valeur moyenne entre deux valeurs d'HR (finale et initiale). La valeur  $\delta$  de chaque HR est estimée en prenant la valeur maximale entre la précision du dispositif de mesure et la valeur  $\delta$  de l'HR. Les valeurs expérimentales  $m_0$  sont calculées à partir de la courbe de l'évolution de la masse tandis que son  $\delta$  est calculé à partir de la fluctuation de la masse à l'instant  $t = 0$ . L'erreur  $\delta$  des valeurs mesurées  $D_0$  est considérée égale à 10 pixels pour l'image originale et l'image de référence. Enfin, les valeurs de  $\Theta_0$  sont mesurées en comparant le volume expérimental de la goutte de sang au volume théorique en utilisant l'équation (1). Les valeurs de  $\delta$  et de  $\Theta_0$  sont calculées en utilisant le volume maximale et minimale théorique avec leurs incertitudes correspondantes. Le débit d'évaporation initial  $J_0$  est calculé à partir d'une simple dérivation de l'évolution de la masse.

## 3. Résultats

### 3.1. Influence de l'humidité relative sur l'étalement et l'angle de contact

La Figure 2 montre les valeurs  $\Theta_0$  théoriquement mesurées en fonction des différentes valeurs d'HR. Une goutte de sang sur un substrat de verre s'étale quasi-instantanément jusqu'à atteindre son rayon de mouillage initiale et forme un angle de contact inférieur à  $40^\circ$ , due à la faible rugosité et énergie de surface du substrat. La ligne de contact est accrochée durant le processus d'évaporation. Pour une petite goutte avec un rayon de contact inférieur à la longueur capillaire, la goutte adopte une forme sphérique, due aux faibles forces gravitationnelles. Le volume  $V$  de la goutte peut être exprimé géométriquement en fonction de  $R_0$  et  $\Theta_0$ .

$$V(R_0, \theta_0) = \frac{\pi R_0^3 (1 - \cos\theta_0)^2 (2 + \cos\theta_0)}{3 (\sin^3\theta_0)} \quad (1)$$

La Figure 2 montre également  $D_0$  mesuré en fonction des valeurs d'HR. Parce que la ligne de contact ne recule pas pendant le processus d'évaporation, le diamètre de dépôt varie très peu au temps  $t_F$ , résultant d'une région de dépôt proche de la région de dépôt d'étalement initial. Ce temps  $t_F$  est en relation avec  $D_0$  et peut être exprimé comme suit:

$$t_F = \frac{4RTm_0}{\pi\Delta P D_0 D_{diff}} \quad (2)$$

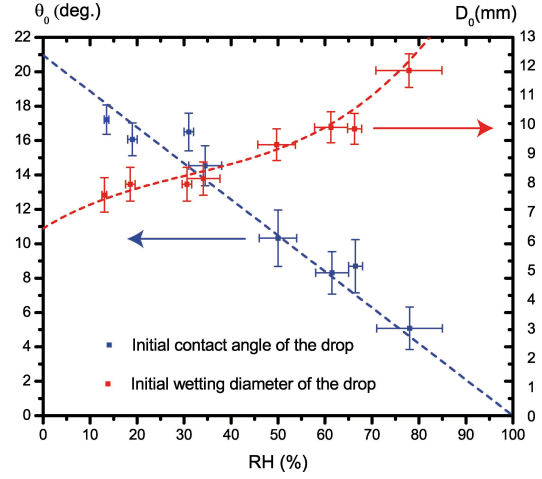
Avec  $\Delta P$  est la différence entre la pression de saturation et l'air. À 13.5% d'HR,  $D_0$  est de 7,6 mm, ce diamètre augmente avec l'augmentation de l'HR. L'angle  $\theta_0$  extrait de la Figure 2 est, respectivement,  $17.2^\circ$  à 13.5% d'HR et  $5.1^\circ$  à 78.0% d'HR. On peut déduire que l'augmentation linéaire de  $\theta_0$  conduit à une diminution du  $D_0$  de la goutte de sang pour des taux d'évaporation élevés (faibles valeurs d'HR). On peut établir la variation de l'angle de contact avec l'HR dans l'équation (3) et du rayon de mouillage avec l'HR dans l'équation (4). D'où, en remplaçant l'équation (3) dans l'équation (1), on obtient l'équation de  $R_0$  en fonction de l'HR (Eq. 4).

$$\theta_{(HR)} = 21(1 - HR) \quad (3)$$

$$R_{(HR)} = \left( \frac{3V}{\pi (2 + \cos\theta_{HR})(1 - \cos\theta_{HR})^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$



Figure 2: Variation de  $\theta_0$  et du  $D_0$  d'une goutte de sang en fonction des valeurs de l'HR ( $t_a = 23.8^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ , HR variant entre 13.5% et 78.0%). les lignes en pointillés correspondent à une régression linéaire de  $\theta_0$  et à une régression cubique du  $D_0$  passant par les points de mesures.



### 3.1. Influence de l'humidité relative sur la formation du motif

L'influence de l'HR sur le motif final de séchage a été étudiée en évaporant même volume de gouttes de sang à des HR différentes. Les images finales présentées dans la Figure 3, montrent les évolutions morphologiques et structurales d'une goutte de sang total séchée à des HR différentes. Dans le cas d'une ligne de contact accrochée et pour un angle de contact inférieur à  $90^\circ$ , Hu et Larson ont étudié expérimentalement l'évaporation d'une goutte sessile en utilisant la méthode des éléments finis [16]. Ainsi, il obtient une expression analytique du taux de perte de masse à partir d'une goutte pour n'importe quel angle de contact :

$$J_{HLO} = \frac{dm}{dt} = \pi R_0 D_{diff} C_v (1 - HR) f(\theta) \quad (5)$$

$C_v(1-HR)$  est la différence de concentration de vapeur dans l'air entre l'interface de la goutte et l'infini,  $f(\theta) = 0.27\theta^2 + 1.30$  est une fonction qui dépend de l'angle de contact. Pour des  $\theta_0 < 40^\circ$ ,  $f(\theta)$  est presque plat. L'influence de  $\theta_0$  est négligeable, et le flux d'évaporation est constant dans le temps, même si ce flux augmente à proximité de la ligne de contact de la goutte. Ainsi, l'équation (5) montre que le débit d'évaporation dépend de la concentration de vapeur lors de l'évaporation à différentes valeurs d'HR. Utilisant l'équation (3),  $f(\theta)$  peut s'écrire sous la forme:

$$f_{(HR)} = (3.59 \times 10^{-2}) HR^2 - (7.18 \times 10^{-2}) HR + 1.33 \quad (6)$$

Lorsque l'angle de contact diminue en fonction du taux d'évaporation pour des angles de contact inférieurs à  $40^\circ$ ,  $f(\theta)$  est quasi-constante et peut être approximée à 1.33. Par conséquent, l'équation (5) est exprimée comme suit:

$$J_{blood} = \pi R_{(HR)} D_{diff} C_v (1 - HR) f_{(HR)} \quad (7)$$

Dans la Figure 3, on observe clairement une évolution structurale et par conséquent une évolution morphologique du motif de séchage final. Lorsque l'évaporation de la goutte de sang est terminée, le motif de séchage final est caractérisé par la présence de trois régions distinguées comme en témoigne la Figure 3: une partie centrale composée d'un réseau de craquelures désordonnées, une couronne périphérique composée de plaques trapézoïdales mobiles délimitées par des fractures radiales et un anneau périphérique complètement adhérent au substrat. On observe cependant que la largeur des plaques mobiles et le dépôt d'adhésion dans la couronne périphérique de la goutte

de sang augmentent avec l'HR. De plus, les plaques mobiles de la couronne sont plus déplacées vers le centre de la goutte laissant un dépôt plus large composé de plaques délimitées par des fractures sombres. En outre, la Figure 3 montre que les plaques mobiles dépendent de la cinétique d'évaporation. A une cinétique d'évaporation lente (forte HR), des plaques mobiles à forte adhérence sont observées par rapport à une cinétique d'évaporation rapide (faible HR). En effet, les régions à faibles adhérences sont mises en évidence par des régions circulaires de couleur rouge clair et qui sont inclus dans chacune des plaques mobiles de la couronne. Dans la section suivante, de plus amples détails seront fournis en ce qui concerne les différences entre les différents motifs.

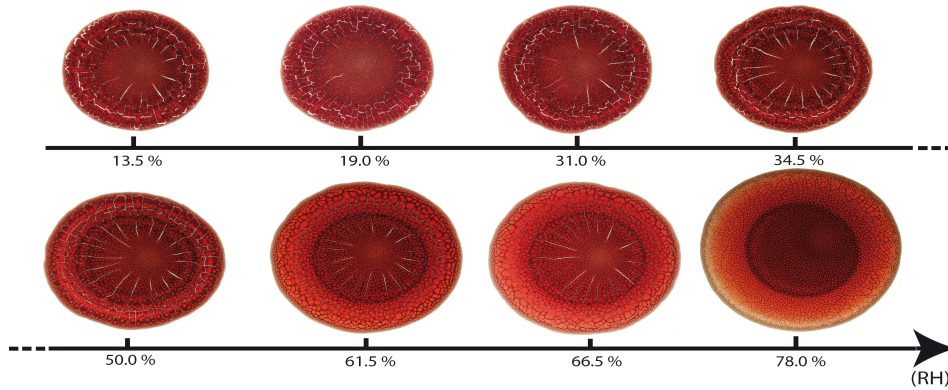


Figure 3: Images en vue de dessus (même échelle) du dépôt final après l'évaporation totale d'une goutte sessile de sang total. Toutes les expériences sont réalisées pour un même volume ( $V=14.2\mu\text{l}$ ) et pour un rang d'HR (substrat de verre ultra-propre,  $T_a: 23.8^\circ\text{C}$ ,  $P_a: 1005\text{ hPa}$ ).

#### 4. Discussion

Une goutte de sang déposée doucement sur un substrat de verre ultra-propre, s'étale jusqu'à atteindre un rayon de mouillage maximal avec une vitesse de la ligne triple proportionnelle à la cinétique d'évaporation. Lors de l'évaporation d'une goutte de sang avec une cinétique d'évaporation lente, la vitesse d'étalement diminue tandis que le temps d'accrochage de la ligne triple augmente durant la phase d'évaporation. De plus,  $\theta_0$  diminue pour chaque valeur d'HR dû à l'accrochage continu de la ligne triple et de l'évaporation. L'observation des valeurs élevées de  $D_0$  à des cinétiques d'évaporation lentes peuvent être attribuées à des faibles valeurs de  $\theta_0$  lors de l'étalement de la goutte. Ces observations sont en bon accord avec le travail expérimental de Chhasatia et al. [28], qui ont montré que l'HR influence l'angle de contact et l'étalement d'une goutte de suspension colloïdales. Ils ont introduit une fonction qui lie l'angle de contact dynamique à la cinétique d'évaporation en utilisant les études empiriques antérieures de l'étalement des fluides non volatils. Il est évident que, lorsqu'on augmente le niveau d'HR, l'air ambiant des gouttes de sang devient plus saturé en concentration de vapeur. Ainsi, la diffusion des molécules dans l'air diminue et par conséquent la cinétique d'évaporation diminue et le temps d'évaporation augmente. La Figure 4 illustre l'influence des variations à la fois de  $\theta_0$  et de  $D_0$  sur  $J_{\text{blood}}$ . Il semble que nos résultats expérimentaux sont en bonne corrélation avec notre modèle théorique de diffusion qui diminue avec l'HR. Ces résultats obtenus montrent une forte dépendance du  $J_{\text{blood}}$  due à l'influence de l'HR sur  $\theta_0$  et  $D_0$ .

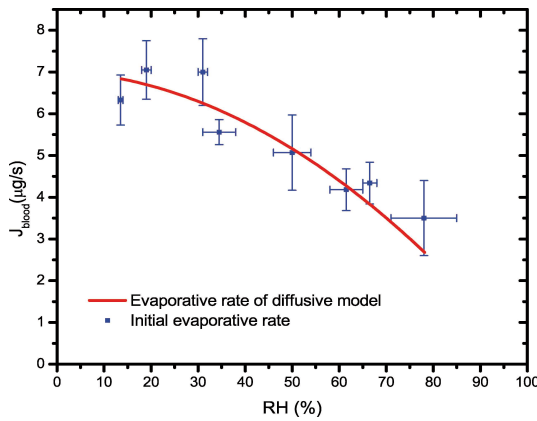


Figure 4: Variation du débit d'évaporation initial en fonction d'HR: résultats expérimentaux (points) et le modèle théorique de diffusion (en ligne rouge).

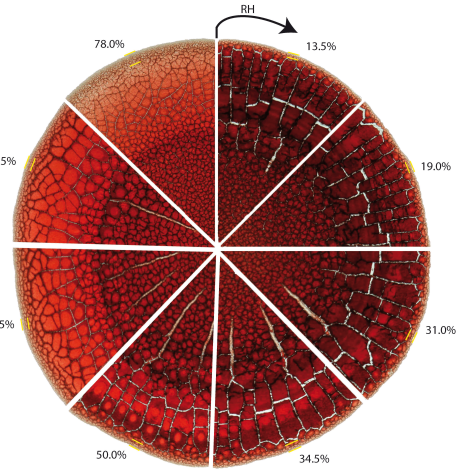


Figure 5: Morphologie de dépôt final pour différentes valeurs d'HR variant entre 13.5% et 78.0%. Les régions entre deux tirets (jaune) représentent la région périphérique de la couronne.

Le motif de séchage final et de nucléation varie avec la cinétique d'évaporation (Fig.5). Dans nos conditions expérimentales, le transfert de vapeur d'eau dans l'air est limité par la diffusion et contrôlé par l'HR de l'air ambiant. Le séchage d'une goutte de sang se caractérise par une évolution en un gel saturé en solvant. Lorsque le gel est formé, la nouvelle matrice poreuse formée par l'agrégation de particules continue de s'assécher par l'évaporation du solvant. Il en résulte une densification du gel. Au fur et à mesure que le liquide migre progressivement dans le milieu poreux, il se forme des ménisques au niveau de l'interface solvant/air due à la pression capillaire entre les particules. Au cours de l'évaporation du solvant, la courbure de ces ménisques est responsable d'une pression capillaire dans la phase liquide dont sa valeur maximale dans le gel peut atteindre:

$$P_{cap} = \frac{\alpha \gamma_{(s,a)} \cos(\theta)}{r_p} \quad (7)$$

Avec  $\alpha$  est une constante géométrique égale à 10 [35]. Cette dépression induit une rétraction de la matrice poreuse qui est limitée par son adhésion au substrat de verre et à l'évaporation du solvant. Au fur et à mesure que les tensions capillaires augmentent, les contraintes internes augmentent et des fractures apparaissent afin de libérer une partie de l'énergie mécanique. En supposant que la gélification est due à l'accumulation de particules, la différence de motifs observés est due à la compétition entre le processus de séchage et l'adhérence du gel sur le substrat. Les images finales présentées dans la Figure 5 montrent que l'aire de la surface de la région d'adhérence des plaques mobiles est fortement dépendante de la cinétique d'évaporation. En modifiant la cinétique d'évaporation, les propriétés mécaniques du gel sont modifiées tels que l'énergie d'adhésion du gel sur le substrat de verre (théorie de Griffith). En effet, l'aire de la surface des plaques mobiles de gouttes de sang séchées à des HR variant entre 13.5% et 50.0% devient progressivement plus importante avec une région d'adhérence plus faible. Cette région se rétrécit jusqu'à la formation d'une région d'adhérence circulaire qui conduit à un processus de délaminage. Pour des images, où l'HR est supérieure à 50%, les plaques mobiles sont plus petites avec une région d'adhérence plus élevée. Cette observation est due au processus de flambage qui est rapidement surmontée par l'adhérence du gel sur le substrat. Dans le cas d'un gel colloïdal desséchée à une HR de

70% et de 46%, Pauchard et al. a montré expérimentalement que l'adhérence complète ou la de-adhérence est fonction de l'aire de la surface cellulaire. De plus, l'augmentation de la largeur du dépôt final (les 2 tirets en jaune dans la Figure 5) dans la région annulaire périphérique complètement adhérent au substrat de verre est due à la régression du front de gel provoquant l'absence des globules rouges. Ce résultat est dû à un changement de l'écoulement interne qui transporte les globules rouges à partir du centre vers la périphérie de la goutte de sang.

## 5. Conclusions

L'influence de l'humidité relative (HR) sur l'étalement et la formation de motif est étudiée. Des gouttes de sang de même volume sont déposées sur un substrat de verre ultra-propre s'évaporent dans une boîte à gants avec une HR contrôlée entre 13.5% et 78.0%. Nos expériences montrent que  $\theta_0$  qui diminue en fonction de l'HR influe le motif final de séchage. En raison de l'influence de l'HR sur  $\theta_0$  de la goutte de sang, le débit d'évaporation initial dépend aussi de l'HR. Le motif de séchage final à la fin du processus d'évaporation est dû à la compétition entre le régime de séchage et la gélification. De plus, la transition entre la phase d'évaporation convective et la phase de gélification apparaît toujours à 65% de la durée totale de séchage. Ainsi, en contrôlant la cinétique d'évaporation pour des gouttes de sang qui s'évaporent à différentes HR, les propriétés de mouillabilité et le motif final de séchage sont modifiés.

## Références

- [1] Jing, J.; Reed, J.; Huang, J.; Hu, X.; Clarke, V.; Edington, J.; Housman, D.; Anantharaman, T. S.; Huff, E. J.; Mishra, B.; Porter, B.; Shenker, A.; Wolfson, E.; Hiort, C.; Kantor, R.; Aston, C.; Schwartz, D. C. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **95**, 8046, (1998).
- [2] Kim, D.; Jeong, S.; Park, B. K.; Moon, J. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 264101, (2006).
- [3] Park, J.; Moon, J. *Langmuir*, **22**, 3506, (2006).
- [4] Kawase, T.; Sirringhaus, H.; Friend, R. H.; Shimoda, T. *Adv. Mater.*, **13**, 1601, (2001).
- [5] Norris, D. J.; Arlinghaus, E. G.; Meng, L.; Heiny, R.; Scriven, T. *Adv. Mater.*, **16**, 1393, (2004).
- [6] Yakhno, T. J. *Colloid Interface Sci.*, **318**, 225, (2008).
- [7] Brutin, D.; Sobac, B.; Loquet, B.; and Sampo, J. *J. Fluid Mech.*, **667**, 85-95, (2011).
- [8] Sobac, B.; Brutin, D. *Phys. Rev. E*, **84**, 011603, (2011).
- [9] Takhistov, Chang HC.; *Ind Eng Chem Res*, **41**(25), 62566269, (2002).
- [10] Ragoonanan V.; Aksan A. *Biophys. J.*, **94**(6), 22122227, (2008).
- [11] R.D. Deegan, O. Bakajin, T.F. Dupont, G. Huber, S.R. Nagel, and T. A. Witten, *Nature*, **19**, 827-829, (1997)
- [12] V. N. Truskett and K. J. Stebe, *Langmuir*, **19**, 8271- 8279, (2003).
- [13] M. Maillard, L. Motte, and M.-P. Pileni, *Advanced Materials*, **13**, 200-204, (2001).
- [14] H. Hu and R. G. Larson, *Journal of Physical Chemistry B*, **110**, 7090-7094, (2006).
- [15] Shin, D.H.; Lee, S.H.; Jung, J.; Yoo, J.Y. *Microelectron. Eng.*, **86**, 1350, (2009).
- [16] D. Bonn, *Review of Modern Physics*, **81**, (2009).
- [17] G. Gauthier, V. Lazarus and L. Pauchard, *Europhys. Lett.*, **89**, 26002., (2010).
- [18] K. I. Dragnevski, A. F. Routh, M. W. Murray and A. M. Donald, *Langmuir*, **26**, 77477751, (2010).
- [19] L. Goehring, W. J. Clegg and A. F. Routh, *Langmuir*, **26**, 92699275, (2010).
- [20] Deegan, R. D., *Phys. Rev. E*, **61**, 475-485, (2000).
- [21] T. Still, P. J. Yunker, and A. G. Yodh, *Langmuir*, **28**, 4984-4988, (2012).
- [22] E. R. Dufresne, E. I. Corwin, N. A. Greenblatt, J. Ashmore, D. Y. Wang, A. D. Dinsmore, J. X. Cheng, X. S. Xie, J. W. Hutchison and D. A. Weitz, *Phys. Rev. Lett.*, **91**, 224501, (2003).
- [23] W. P. Lee and A. F. Routh, *Langmuir*, **20**, 98859888, (2004).
- [24] Brutin D., Sobac B., Nicloux C., *Journal of Heat Transfer* **134**, 061101, (2012).
- [25] Alvaro G. Marin, Hanneke Gelderblom, Detlef Lohse, and Jacco H. Snoeijer, *Phys. Rev. Lett.*, **107**, 08552, (2011).
- [26] Yakhno, T., *J. Colloid Interface Sci.*, **318**, 225230, (2008).
- [27] Zhuang, H., Coulepis, A. G., Locarnini, S. A., and Gust, Bull. World Health Organ, **60**, 783787, (1982).
- [28] Viral H. Chhasatia, Abhijit S. Joshi, Ying Sun, *Applied Physics Letters*, **97**, 231909, (2010).
- [29] T. A. Yakhno, O. A. Sanina, M. G. Volovik, A. G. Sanina, and V. G. Yakhno, *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, **2229**, 82, (2012).
- [30] Yuri Yu. Tarasevich, Irina V. Vodolazskaya, Olga P. Isakova, *Colloid Polym Sci*, (2011).
- [31] Y. Y. Tarasevich and D. M. Pravoslavnova, *European Phys. J. E*, **22**, 311-314, (2007).
- [32] V. N. Shabalin and S. N. Shatokhina, *Singapore Med. J.*, **48**, 440, (2007).
- [33] I. I. Smalyukh, O. V. Zribi, J. C. Butler, O. D. Lavrentovich, and G. C. L. Wong, *J. Fluid Mech.*, **48**, 440, (2006).
- [34] C. C. Annarelli, J. Fornazero, J. Bert, and J. Colombani, *Eur. Phys. J. E*, **5**, 599, (2001).
- [35] C. J. Brinker and G. W. Scherer, *Sol-gel science: the physics and chemistry*.