Impact et étalement de micro-gouttes sur des substrats solides

Sandrine Allaman, Guido Desie, Damien Vadillo, Arthur Soucemarianadin

► To cite this version:

Sandrine Allaman, Guido Desie, Damien Vadillo, Arthur Soucemarianadin. Impact et étalement de micro-gouttes sur des substrats solides. *Mécanique et Industries*, 2003, 4 (4), pp.443-455. 10.1016/S1296-2139(03)00080-0 . hal-02523489

HAL Id: hal-02523489

<https://hal.science/hal-02523489>

Submitted on 29 Mar 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution| 4.0 International License

Impact et étalement de micro-gouttes sur des substrats solides

Impact and spreading of micro-drops onto solid substrates

Sandrine Allaman^a, Guido Desie^a, Damien Vadillo^b, Arthur Soucemarianadin^{b,*}

^a Agfa-Gevaert Group N.V., Septesstraat 27, B-2640 Mortsels, Belgique

^b Laboratoire des écoulements géophysiques et industriels (LEGI), UMR 5519, UJF-INPG-CNRS, BP 53, 38041 Grenoble cedex 9, France

Résumé

L'objectif de cet article est de présenter une étude à la fois expérimentale et de modélisation simple des différents phénomènes hydrodynamiques liés à l'impression par jet d'encre en se limitant aux phénomènes d'impact et d'étalement. L'imbibition de micro-gouttes dans des milieux poreux, qui est un paramètre essentiel dans le rendu de la qualité d'impression, sera considérée ultérieurement. Les écoulements considérés ici sont caractérisés par des méthodes expérimentales basées sur la cinématographie rapide et la pseudo-cinématographie à déphasage contrôlé conjuguées à de l'analyse d'image. Ces techniques permettent de mesurer avec précision les profils des micro-gouttes suivant des échelles spatiales et temporelles très petites. La modélisation de la dynamique des gouttes est effectuée en utilisant le principe variationnel pour une géométrie déterminée de goutte. Ceci conduit à obtenir le diamètre et la hauteur de goutte au cours du temps et ce lors de l'étalement inertiel et des phases de coalescence et de ré-étalement. Nous présentons ensuite l'évolution transitoire des angles de contact lors de l'impact de gouttes sur des substrats de différentes mouillabilités ainsi que des étalements différenciés en temps court et long pour les micro-gouttes. Nous concluons en montrant que la modélisation effectuée permet de bien refléter l'influence des interactions entre le fluide et le substrat.

Abstract

In this article, various hydrodynamic phenomena associated with ink jet printing process are investigated. This study is limited to the impact and initial spreading phases, the capillary wicking into porous media which is paramount in defining the print quality will be considered elsewhere. The experimental methods used are based on high-speed cinematography and phase controlled ultra short snapshots of the impact process, which allow to measure accurately the transient diameters and heights of the micro-drops on extremely small spatial and time scales. Drop dynamics modeling is performed by solving a variational problem for a given drop geometry. This allows to obtain the drop profiles during the very short inertial impact, spreading and eventual coalescence phases. We then present the transient evolution of the apparent contact angles on substrates with different wetting behavior and discuss the short and long time spreading behavior of micro-drops. We finally show that the proposed model while agreeing fairly well with experiments is able to predict the influence of the interactions between the fluid and the substrate.

Mots-clés : Impact ; Étalement ; Angle de contact apparent ; Mouillabilité des surfaces ; Modélisation des phénomènes d'interface

Keywords: Impact; Spreading; Apparent contact angle; Wetting behavior of surfaces; Modeling of interfacial phenomena

1. Introduction

L'impact d'une goutte sur une surface est un problème répandu dans la nature et avec de nombreuses applications

dans l'industrie. On peut ainsi citer par exemple diverses situations dans le domaine aéronautique, le nucléaire, le secteur pétrolier ou encore les industries graphiques ou pharmaceutiques. L'absence de frontières fixes, l'implication de plusieurs domaines scientifiques et techniques telles que la mécanique des fluides, la rhéologie et la physico-chimie des interfaces, en font un problème complexe étudié depuis longtemps [1–4]. En effet, la goutte peut avoir différentes mor-

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : guido.desie.gd@belgium.agfa.com (G. Desie), arthur.soucemarianadin@ujf-grenoble.fr (A. Soucemarianadin).

Nomenclature

a	pré-facteur (degrés (s/m) ^{1/n})	U	vitesse de la goutte avant impact m/s
c	célérité du son dans le liquide m/s	V	vitesse de la ligne de contact m/s
Ca	nombre capillaire (sans dimensions)	Re	nombre de Reynolds (sans dimensions)
D_0	diamètre de la goutte avant impact m	We	nombre de Weber (sans dimensions)
Fr	nombre de Froude (sans dimensions)	α	coefficient (sans dimensions)
g	accélération de la pesanteur m/s ²	$\beta_{\max}$	rapport d'étalement maximal (D/D_0 : sans dimensions)
$G(h), I(h), J(h)$ et $K(h)$	coefficients (sans dimensions)	μ	viscosité dynamique du liquide Pa s
Ma	nombre de Mach (sans dimensions)	θ	angle de contact (en degrés)
n	coefficient de la loi puissance	ρ	densité du liquide kg/m ³
Oh	nombre d'Ohnesorge (sans dimensions)	σ	tension superficielle entre le liquide et l'air N/m
$R(t)$	rayon de la goutte en étalement m		
t	temps s		
t^*	temps caractéristique adimensionnel (tU/D_0)		

phologies lors de sa chute et au moment de l'impact et ce en fonction des conditions de sa formation, des phénomènes de rupture amenant sa chute, de sa composition chimique, et des conditions de son environnement de chute. Ces très nombreuses possibilités expliquent, en partie, qu'il reste encore des situations qui méritent d'être approfondies [5–8].

Le sujet d'étude générique est celui de l'impact de la micro-goutte de quelques dizaines de micromètres sur des surfaces solides de nature très diverses qui est un problème commun dans le procédé par jet d'encre [9–11]. Les problèmes fondamentaux abordés sont ceux de la dynamique de l'étalement de la goutte avec des non-linéarités liés au comportement du fluide et aux conditions aux limites. Dans le cadre de ce travail, on veut étudier expérimentalement et modéliser les mécanismes d'étalement de la goutte sur la surface dans le cas de vitesses d'impact faibles ou moyennes et les corrélater avec les propriétés mécaniques des systèmes en présence. Dans le cas de faibles vitesses d'impact, il est connu que l'effet de la tension superficielle est prédominant dans le phénomène d'étalement alors que le processus est en partie contrôlé par la compressibilité du fluide dans le cas de vitesses d'impact importantes comme décrits par Rein [12].

Les méthodes de pseudo-cinématographie rapide qui ont été mises au point par ailleurs pour détailler les mécanismes de propagation d'instabilités capillaires dans les jets de fluide [13,14] sont ici étendues et améliorées pour l'étude des impacts de micro-gouttes. Ces méthodes sont associées à des moyens sophistiqués d'acquisition et de traitement d'images. Pour franchir un pas important du point de vue expérimental, il est nécessaire notamment de mesurer avec précision la surface libre transitoire de la goutte lors de son impact en s'intéressant à la ligne de contact triple. Par ailleurs, un effort particulier est apporté à l'étude de l'interaction de différents paramètres (tension superficielle du fluide, vitesse d'éjection, angle de contact solide-fluide,

etc.) pour définir le développement des singularités et des seuils physiques de l'écoulement.

Enfin nous obtenons grâce à une modélisation simplifiée basée sur le principe variationnel, les diamètres et hauteurs transitoires des micro-gouttes [15–17]. Différentes géométries de base peuvent être adoptées pour la goutte en phase d'étalement et nous avons fait ici le choix de la sphère tronquée pour des raisons liées à notre utilisation. Le modèle proposé comporte également un coefficient de dissipation obtenu par comparaison avec les résultats expérimentaux [16]. Nous montrons que cette géométrie particulière permet de modéliser convenablement la phase d'étalement inertiel et la coalescence lorsque celle-ci reste faible.

Les essais ont été menés avec des fluides à faible et forte tension superficielle sur des substrats présentant des mouillabilités différentes. Il s'avère que l'écoulement est essentiellement régi par les nombres de Weber et de Reynolds ce qui permet de conduire les essais avec des gouttes plus grandes possédant des temps caractéristiques plus élevés et mieux résolus par les techniques utilisées [17]. Cette meilleure résolution expérimentale est mise à profit notamment pour mesurer avec précision l'évolution transitoire de l'angle de contact apparent lors de l'impact sur des substrats différents. Les essais préliminaires effectués sur des micro-gouttes de quelques dizaines de micromètres de diamètre montrent d'une part la validité de l'approche utilisant les nombres adimensionnels, d'autre part des aspects spécifiques liés à la très petite taille des gouttes et qui requièrent une étude plus poussée.

Dans cet article, nous décrivons d'abord la partie expérimentale en détaillant l'équipement, les fluides et les substrats utilisés. Nous introduisons ensuite la modélisation basée sur le principe variationnel en précisant les différentes hypothèses. Nous commentons les différents essais effectués en comparant chaque fois avec les résultats de la modélisation pour bien faire les aspects positifs et les désaccords. Enfin nous montrons, grâce aux essais effectués sur des substrats

spécifiques pour jet d'encre, comment l'approche adoptée devrait conduire à un meilleur dimensionnement des caractéristiques des substrats.

2. Dispositifs et procedure experimentaux

Afin de collecter des données expérimentales nouvelles nécessaires pour cette étude, il a fallu mettre en place des maquettes originales. Le montage expérimental réalisé pour cette étude est d'abord basé sur un système de formation de gouttes. Afin de couvrir une large gamme de nombres adimensionnels, il est nécessaire d'éjecter de grosses gouttes

(obtenues par une pompe à seringue) ainsi que des gouttes extrêmement petites (obtenues avec une tête d'impression commerciale). Pour un système d'éjection déterminé, des tailles et des vitesses variables de gouttes peuvent être obtenues en variant dans une certaine mesure les propriétés des fluides. Les Figs. 1(a) et 1(b) illustrent les deux possibilités à base de pompe et d'éjecteur multi-gouttes.

Le montage comporte également le système d'observation comprenant une source lumineuse de forte puissance équipée de filtres, une caméra rapide couleur, une caméra noir et blanc de haute résolution à temps d'intégration très court et un système optique à base d'un zoom permettant différents grossissements. Le système de pilotage et d'ac-

(a)

(b)

Fig. 1. (a) Dispositif expérimental pour la dispense de grosses gouttes. (b) Dispositif d'éjection de micro-gouttes.

quisition des données comprend l'électronique de détection de goutte, de déclenchement de la caméra, l'électronique de pilotage des têtes d'impression et enfin les logiciels de d'enregistrement et de traitement des images.

2.1. Ejection de la goutte

Des gouttes ayant un rayon de l'ordre du millimètre sont créées en éjectant des encres de compositions différentes, à l'aide d'une pompe Gilson 402. La taille des gouttes est réglée en changeant le diamètre de l'aiguille de la seringue. Ainsi, il a été possible de former des gouttes de 1,6 à 3 mm de diamètre. La vitesse des gouttes peut varier de 0,3 à 3 m/s en changeant simplement leur hauteur de chute c'est à dire la distance entre l'aiguille et le substrat. La vitesse de la goutte est calculée en mesurant la variation de la distance de vol entre deux images prises avec une caméra rapide et avec un délai contrôlé. Les tailles et les vitesses de gouttes obtenues sont en bonne corrélation avec les valeurs attendues d'après les données de Range et Feuillebois [5].

D'autres tailles de gouttes ayant des volumes compris entre 50 et 150 picolitres sont créées en utilisant soit une tête d'impression thermique, soit une tête piézoélectrique. Dans le premier cas un signal de quelques microsecondes et d'amplitude variable est envoyé à une résistance à l'intérieur de cette tête jet d'encre. Cette résistance chauffe et crée une bulle d'air dans le liquide ce qui permet l'éjection de la goutte. En ce qui concerne la tête piézoélectrique le déplacement du transducteur conduit à l'éjection de la goutte. Les vitesses d'éjection de la goutte dépendent de l'amplitude de la tension et du fluide utilisé et peuvent varier de 1 à 10 m/s. Cette vitesse est déterminée par une double exposition très rapprochée en utilisant la caméra à temps d'exposition très court de quelques centaines de nanosecondes.

2.2. Techniques de visualisation

Tous les essais sur les grosses gouttes (de l'ordre de 2 mm de diamètre) sont faits en utilisant une caméra rapide, Kodak HG2000. Celle-ci permet de capturer des images de 512×356 pixels à une fréquence de 1000 images par secondes. Le temps d'acquisition pour cette caméra est au minimum de 23 μ s. Les avantages de cette technique de cinématographie rapide est qu'elle ne nécessite pas une reproductibilité parfaite d'une expérience à l'autre puisqu'on traite en priorité une série d'essais. Cela permet d'ailleurs de tester si les phénomènes d'impact sont répétitifs. L'inconvénient de cette méthode est un intervalle de temps de 1 ms entre deux images, et de ce fait les phénomènes se produisant en un laps de temps plus court ne peuvent pas être détectés. Ceci est le cas par exemple des étalements inertiels de petites gouttes. Pour remédier à ce problème, une caméra vidéo PCO Sensicam, à court temps d'acquisition, est utilisée pour capturer une image à haute résolution 1280×1024 pixels. Cette technique est extrêmement utile pour des phénomènes

transitoires tel que l'étalement inertiel de petites gouttes. En utilisant des signaux électroniques externes, plusieurs images de gouttes, prises à différents intervalles de temps, sont combinées en un film vidéo selon la technique pseudo-cinématographique [14,17].

2.3. Acquisition et traitement des images

Quand la goutte arrive près du substrat, elle est détectée par une barrière optique qui envoie un signal au système de pilotage [7]. Ce dernier envoie des commandes à l'un des deux types de caméras décrits ci-dessus pour commencer la prise d'images. Pour ce qui concerne la caméra Kodak, les images sont enregistrées toutes les millisecondes alors que pour la caméra PCO Sensicam, une ou plusieurs images (jusqu'à 8) peuvent être enregistrées et le début d'enregistrement peut être variable ce qui permet ensuite de les combiner pour obtenir le film.

Une fois que l'acquisition des images est terminée, le traitement commence par la détermination de niveaux de gris pour bien définir les bords de la goutte. Le rayon de la goutte lors de son étalement, sa hauteur et l'angle de contact apparent sont ensuite déterminés en utilisant un logiciel de traitement d'images (Image-Pro Express).

2.4. Compositions des fluides

Les encres qui sont utilisées dans ces expériences sont développées pour fonctionner avec différents types de têtes d'impressions (piézoélectriques, thermiques). Ces fluides contiennent une base aqueuse et du glycérol dans le but de pouvoir faire varier la viscosité et la tension superficielle. Des compositions d'encres avec des viscosités variant de quelques mPa.s à quelques centaines de mPa.s ont été utilisées pour cette étude [18].

2.5. Propriétés des substrats

Différents types de matériaux sont testés au travers de cette étude, en passant par du verre, du téflon, des papiers jet d'encre gélant avec une couche superficielle polymérique, des papiers microporeux (taille des pores autour de 10 nm), ainsi que des matériaux macroporeux (pores d'environ 1000 nm). Les matériaux poreux tests sont obtenus par des couchages composés de pigments (nanoparticules) et de polymères sur un substrat en polyéthylène-téréphtalate (PET) et sont caractérisées par porosimétrie mercure et l'adsorption de gaz pour les papiers ayant les pores les plus fins [18].

3. Modelisation de l'impact

Dès qu'il y a un contact entre une goutte et une surface solide, le liquide commence à s'étaler. Lorsque la goutte est

placée délicatement sur la surface, le phénomène d'étalement est dominé par des forces intermoléculaires. La dépendance en temps de l'évolution du rayon de la surface mouillée et de l'angle de contact peut être décrit par des lois universelles [19]. Très récemment, il a été montré qu'il y avait différents régimes et des échelles de temps associés dans lesquelles un régime particulier était prépondérant [20]. Si les études décrivant l'étalement d'une grosse goutte dans le cas de vitesse de dépôt très faibles sont connues et bien étayées, celles concernant les cas d'intérêt dans le domaine de l'impression : diamètres de gouttes de quelques dizaines de micromètres et des vitesses de quelques m/s sont bien moins nombreuses notamment en raison de la difficulté à mesurer des phénomènes se passant à des échelles de temps et de longueurs qui sont très petites.

3.1. Etalement maximal lors de l'impact

La formulation mathématique du problème d'impact de la goutte sur une surface solide amène à considérer l'équation de continuité et les équations de la quantité de mouvement dans les deux directions, radiale et axiale. Le processus d'adimensionalisation [21] fait apparaître les nombres sans dimensions ci-dessous de Reynolds, Weber, Froude, Mach, respectivement :

$$\begin{aligned} Re &= \frac{\rho U D_0}{\mu}, & We &= \frac{\rho U^2 D_0}{\sigma}, \\ Fr &= \frac{U^2}{D_0 g}, & Ma &= \frac{U}{c}. \end{aligned} \quad (1)$$

Dans le cas d'une vitesse d'impact déterminée, l'étalement est essentiellement gouverné par l'inertie de la goutte et il est ralenti par des effets de viscosité et de tension superficielle. Lorsque l'énergie d'inertie est dissipée, la goutte atteint son diamètre maximal. Un modèle prédisant ce diamètre maximal, est déduit de la conservation d'énergie [22, 23] et s'écrit :

$$\beta_{\max}^2 = \frac{-(1 - \cos \theta) + \sqrt{(1 - \cos \theta)^2 + 6\alpha Ca(We/3 + 4)}}{3\alpha Ca} \quad (2)$$

Ca est le nombre capillaire égal à $\mu U / \sigma$, indiquant la compétition des forces visqueuses et des forces de tension superficielles. La vitesse prise en compte pour la construction du nombre capillaire est la vitesse de la goutte avant impact. Le facteur semi-empirique α tient compte de la dissipation et dépend sans doute du fluide et des conditions opératoires. Cet aspect est actuellement à l'étude.

D'après les règles de similarité, les expériences réalisées avec une goutte de diamètre de 2 mm peuvent être comparées à celles créent avec une tête d'impression où la goutte a un diamètre de 50 μm , à la condition que les nombres adimensionnels de l'Éq. (1) restent les mêmes pour les deux expériences. Un grand nombre d'essais préliminaires ont été réalisés (Figs. 2(a) et 2(b)). Nous avons à chaque fois mesuré la dimension de la tache maximale pendant la phase

Fig. 2. (a) Profil transitoire de la goutte à faible vitesse ($We = 6$). (b) Profil transitoire de la goutte à faible vitesse ($We = 163$).

d'étalement avant qu'il n'y ait coalescence. Il s'est avéré que les principaux paramètres contrôlant ce phénomène d'étalement inertiel, étaient bien les nombres de Weber et de Reynolds comme c'est prédit par l'Éq. (2). Ainsi les différentes expériences peuvent être ciblées simplement en variant ces deux nombres. Les tests ont ensuite été effectués en faisant varier les nombres de Weber et de Reynolds sur un grand nombre de substrats, imperméables et poreux, et possédant différentes caractéristiques de mouillage.

L'ensemble des résultats obtenus peut être résumé schématiquement par la Fig. 3 où tous les points expérimentaux obtenus pour des matériaux très différents coïncident avec une courbe maîtresse (en trait plein), obtenue à partir de l'Éq. (2). Ici, le paramètre α (Éq. (2)) est égal à 1,5 et l'angle de mouillage apparent θ vaut 80° . Il s'agit bien entendu ici de l'angle obtenu lors du processus d'étalement suivant l'impact et non pas de l'angle de mouillage statique qui lui dépend des caractéristiques du fluide et du solide. Le bon accord obtenu pour un angle de contact apparent de 80° quelques soient les caractéristiques des matériaux est discuté ailleurs [24]. Nous avons également tracé sur la Fig. 3 la courbe (en tireté) obtenue à partir de l'équation proposée par Asai et al. [9]. Celle-ci donne des résultats plus basses que les valeurs expérimentales pour les nombres de Weber

Fig. 3. Étalement maximum lors de l'impact (phase inertielle).

faibles mais l'accord s'améliore lorsque le nombre de Weber augmente. Il est utile de préciser que nous avons repris l'équation telle quelle est donnée dans [9] sans chercher à optimiser les valeurs des coefficients ce qui conduirait sans doute à un meilleur accord pour les nombres de Weber faibles.

3.2. Dynamique de la goutte

Dans le cas d'une vitesse déterminée, la goutte s'étale de manière radiale sous la forme d'une crêpe (pancake). Nous donnons sur la Fig. 2(a) un exemple de grosse goutte, éjectée avec une vitesse faible, qui s'étale et éventuellement se rétracte.

Cet exemple a été enregistré en utilisant la camera Kodak HG 2000 à une fréquence de 1000 images par seconde et un temps d'acquisition de 50 μ s. Seize images après impact sont montrées et l'on peut remarquer que l'oscillation de la goutte dure plus de 15 ms après l'impact. Cette fréquence d'oscillation est comparable à la fréquence naturelle d'une goutte dans un milieu gazeux. D'autres expériences sont en cours pour confirmer cette tendance.

Lorsque la vitesse est plus élevée comme dans le cas de la Fig. 2(b), l'étalement atteint très vite une position d'équilibre. En effet lorsque le nombre de Weber devient grand, l'énergie cinétique de la goutte est rapidement dissipée et conduit à l'étalement final en quelques ms (3 à 4) avec la for-

mation d'un film fin. Par ailleurs, le film se tend significativement ($\beta_{\max}$ de l'ordre de 3,5) avant que l'étalement ne soit arrêté par la domination de forces de tension superficielle et visqueuses. Dans ce cas d'étalement rapide, on constate que l'on atteint très vite les limites de la cinématographie rapide avec la caméra Kodak et il est nécessaire de faire appel à la caméra Sensicam à temps d'intégration court. La même situation prévaut également dans le cas des petites gouttes éjectées par les têtes d'impression pour lesquelles les phénomènes se produisent à des temps beaucoup plus courts.

Pour obtenir le profil transitoire de la goutte, il faut à priori résoudre les équations de Navier-Stokes par des méthodes relativement sophistiquées [25,26] car les déformations de surface libre sont importantes comme on peut le constater sur les Figs. 2(a) et 2(b). Une autre approche qui ne permet pas d'obtenir les détails fins observés expérimentalement mais capture très bien les variations de hauteur et de diamètre est celle basée sur le principe variationnel. L'avantage de cette méthode réside dans le fait qu'en faisant des hypothèses sur la géométrie de la goutte en train de se déformer, les solutions du problème peuvent être obtenues à partir de la résolution de systèmes différentiels [15–17] avec certains paramètres physiques donnés comme conditions initiales. Nous montrons sur la Fig. 4, la représentation d'une goutte sous la forme d'un cylindre ou d'une sphère tronquée qui sont les configurations de base traitées dans la littérature [15,16] en raison des relations existantes entre le dia-

Fig. 4. Configurations de cylindre et de sphère tronquée de la goutte.

mètre et la hauteur. Pour chacun des ces modèles, d'après le principe variationnel, on écrit que la variation d'énergie entre deux instants est nulle :

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta E_c - \delta E_p + \delta W_f) dt = 0 \quad (3)$$

où E_c représente l'énergie cinétique de la goutte, E_p l'énergie potentielle t le temps. Le travail lié aux frottements δW_f s'exprime sous la forme $\delta W_f = -F\delta y$ où F représente les forces de frottements et y le déplacement de la ligne de frottement.

Dans le cas où les forces de frottements seraient dues à des contraintes de cisaillement, on fait intervenir τ qui est le tenseur des contraintes à la base de la goutte. Le terme de viscosité est pris en compte grâce à la contrainte tangentielle τ s'écrivant sous la forme $\tau = F_d v_r / \sqrt{Oh}$ où F_d est le facteur de dissipation [16], Oh le nombre de Ohnesorge qui est égal à $\mu / \sqrt{\rho \sigma D_0}$ et v_r la composante de la vitesse radiale avec une expression similaire à ce qui est proposé dans [15] et qui respecte l'hypothèse d'incompressibilité. Le coefficient de dissipation F_d permet d'optimiser la correspondance entre prédictions et valeurs expérimentales. En calculant chacun des termes on aboutit à une équation différentielle qui permet de déterminer l'évolution de la hauteur en régime dynamique.

On trouve ainsi pour le modèle de la sphère tronquée une équation différentielle du second ordre :

$$2G(h)h'' - I(h)h'^2 + J(h)h' + K(h) = 0 \quad (4)$$

où h est la hauteur de la goutte, h' et h'' sont les dérivées premières et secondes par rapport au temps. Les coefficients des équations sont des polynômes dépendant de la hauteur et des caractéristiques d'écoulement et de mouillage sur le substrat. Les effets de dissipation sont pris en compte par le coefficient $J(h)$ et ceux de surface par le coefficient $K(h)$ qui inclut un terme avec $\cos \theta$. Il est possible d'obtenir le diamètre de contact de la goutte en utilisant de nouveau le principe variationnel, ce qui conduira à la résolution d'autres équations différentielles, mais il est également possible de le calculer directement en utilisant la relation liant la hauteur et le diamètre dans le cas d'une sphère tronquée [15].

4. Résultats et discussion

Dans cette section, nous présentons tout d'abord les aspects liés aux différences de mouillabilités des substrats ce qui donne des étalements similaires sur les temps courts mais qui changent notablement au cours du temps. Nous montrons également les conséquences de ces phénomènes de mouillabilité sur les variations au cours du temps des angles de contact apparents. Nous discutons ensuite les comparaisons entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par la modélisation. Nous indiquons les différences et explicitons les raisons de notre choix de modèle. Enfin,

une dernière sous-section est consacrée aux essais menés sur des substrats commerciaux, avec des gouttes imprimées par des têtes d'impression jet d'encre, qui permettent de faire ressortir les aspects spécifiques liés à la taille des gouttes.

4.1. Impacts sur substrats de mouillabilités différentes

Tous nos essais ont été effectués de telle façon que les effets de gravité soient négligeables vis-à-vis des effets capillaires, c'est-à-dire avec un nombre de Bond inférieur à 1. Les Figs. 5(a) et 5(b) montrent des photos de l'étalement et de l'éventuelle coalescence de la goutte pour deux différents substrats. La Fig. 5(a) représente des essais sur un substrat plutôt hydrophile avec un angle de contact d'équilibre d'environ une trentaine de degrés. Ce substrat est composé d'une surface non absorbante en PET avec une couche supérieure adhésive dont la composition est à base de copolymère de chlorure de vinyle et de silice colloïdale. Cette couche a une épaisseur d'environ 200 nm et peut être estimée comme étant pratiquement non poreuse. La Fig. 5(b) représente les résultats des essais effectués sur un substrat de polyester (angle de contact d'équilibre d'environ 70°) avec une surface en polyestertéréphthalate ne présentant pas de porosité et de ce fait complètement imperméable.

Dans les essais sur les deux substrats ont été effectués avec une seringue qui permet de former des gouttes d'un diamètre de 2,3 mm. Cette seringue est positionnée à une hauteur de 5 cm du substrat ce qui donne une vitesse terminale très proche de 0,98 m/s. Les photos représentent une moyenne de plusieurs prises effectuées sur des gouttes différentes et au temps indiqué, après impact, en ms sur la photo. On notera sur l'une des photos les définitions du diamètre, de la hauteur, de l'angle de contact et de l'échelle utilisée. La morphologie des gouttes sur les deux substrats est pratiquement similaire avec des petites différences qui deviennent visibles pour les pics qui apparaissent respectivement à 3 et à 8 ms. Ce comportement est similaire, toutes proportions gardées, aux essais effectués par Pasandideh-Fard et al. [22] qui ont pris un substrat donné et ont fait varier les interactions fluide-solide en ajoutant des quantités de surfactant déterminées dans de l'eau. Dans ce cas là, les pics observés étaient beaucoup moins hauts avec le fluide mouillant plus la surface et donc présentant un angle de contact d'équilibre plus petit. Les différences entre nos deux essais deviennent importantes après environ 18 ms lorsque les gouttes s'approchent de l'état d'équilibre.

Les Figs. 6(a) et 6(b) montrent les évolutions transitoires des diamètres et des hauteurs de gouttes sur 3 ordres de grandeurs en temps. Les courbes tracées en semi-logarithmique permettent de bien faire ressortir la pente et de mettre en évidence le comportement sur les temps courts. Il est utile de rappeler ici que des mesures précises d'étalement, dans les premiers instants, ne sont pas nombreuses en raison des limitations liées aux techniques expérimentales [6] et des difficultés à obtenir des étalements de gouttes bien symétriques [7]. Si on définit un temps caractéristique par

(a)

(b)

Fig. 5. (a) Séquence de photos d'étalement et de coalescence sur un substrat hydrophile. (b) Séquence de photos d'étalement et de coalescence sur un substrat hydrophobe.

$t^* = tU/D_0$, on constate que le diamètre est atteint pour t^* égal à 3 avant de commencer à décroître très fortement. Les différences entre les deux substrats sont peu sensibles sur le diamètre mais deviennent très prononcées sur les hauteurs en raison notamment des pics dont nous avons discuté ci-dessus.

4.2. Comparaisons entre les expériences et le modèle variationnel

Dans le but de tester le modèle précédent, des expériences ont été réalisées pour des vitesses relativement proches en utilisant des fluides de compositions variées sur des substrats

(a)

(b)

Fig. 6. (a) Evolution transitoire du diamètre de la goutte pour deux substrats différents. (b) Evolution transitoire de la hauteur de la goutte pour deux substrats différents.

différents. La taille de goutte éjectée est restée la même ($D_0 = 2,3$ mm). Les résultats sont résumés sur les Figs. 7(a) et 7(b) pour ce qui concerne respectivement les diamètres et les hauteurs. L'essai à la vitesse de 1,57 m/s est conduite avec une encre de viscosité de 3 mPa.s et une tension de surface de 32 mN/m. L'essai à 0,98 m/s est faite avec de l'eau sur le même substrat. On peut remarquer que l'encre mouille nettement mieux le solide puisque l'angle apparent est de 10° comparé à 70° pour de l'eau. La pente de la croissance du diamètre est la même pour les deux vitesses alors que l'étalement maximum est très différent. Cet effet peut-être attribué au fait que les nombres de Weber sont dans un rapport d'environ 4 et les différents comportements sont bien reproduits par le modèle grâce à la constante de dissipation F_d . Il faut également remarquer que les valeurs des maximums des deux essais sont en bon accord avec les résultats de la Fig. 3 bien que les nombres de

Reynolds soient significativement différents. Nous montrons par ailleurs [24] que la constante de dissipation ne dépend pas du substrat utilisé et n'est sans doute fonction que de quantités cinématiques. Au total, on peut dire que l'accord entre les expériences et le modèle est bon pour de l'encre alors qu'il se détériore pour l'eau avec le désaccord devenant particulièrement flagrant dans le cas de la hauteur où les pics sont très mal rendus par la simulation. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'en raison du bon mouillage avec de l'encre, les pics sont écrêtés et la forme de la goutte est plus ressemblante à une sphère tronquée alors que l'étalement à plus faible vitesse avec un fluide moins mouillant donne des surélévations de la goutte au centre comme on peut le remarquer sur la Fig. 5(b). Comme notre objectif est d'étudier l'étalement de gouttes d'encre, ayant donc une tension de surface faible, le choix d'une géométrie de base de sphère tronquée semble assez bien adapté.

(a)

(b)

Fig. 7. (a) Comparaison expérience-modèle sur le diamètre pour deux substrats différents. (b) Comparaison expérience-modèle sur la hauteur pour deux substrats différents.

4.3. Variation transitoire des angles apparents de contact

A partir des essais effectués, nous avons choisi d'étudier la variation des angles de contact au cours du temps en avancée et en reculée [27,28]. En effet, il n'existe pas de données pertinentes dans la littérature au niveau de l'influence de la mouillabilité des substrats sur les stades initiaux de l'impact alors que ce paramètre est déterminant pour la qualité de l'impression. La Fig. 8 permet de montrer que l'angle de contact initial est de 120° pour les deux substrats et qu'il n'y a aucune différence apparente entre les substrats hydrophile ($\theta_{\text{eq}} = 25^\circ$) et hydrophobe ($\theta_{\text{eq}} = 70^\circ$) jusqu'à environ 10 ms et ce pour des essais qui sont conduits

avec un diamètre de goutte de 2,3 mm à une vitesse d'impact de 0,98 m/s. Si l'on se réfère à la Fig. 6(a) par exemple, le temps ci-dessus de 10 ms correspond à la phase terminale de la coalescence et à l'apparition de petites oscillations sur le diamètre, oscillations qui sont encore mieux visibles pour les hauteurs (Fig. 6(b)). Il semble donc qu'il faille un temps déterminé avant que l'influence du substrat ne se fasse sentir en imposant doucement l'angle d'équilibre.

Nous avons ensuite cherché à estimer la variation de l'angle de contact en fonction de la vitesse de la ligne de contact [22]. Il est tout d'abord utile d'indiquer que la vitesse de la ligne de contact $V = dR(t)/dt$ est très largement supérieure (environ 7 à 9 fois), initialement, à la vitesse

Fig. 8. Evolution transitoire de l'angle de contact pour deux différents substrats.

Fig. 9. Loi de variation de l'angle de contact pour le substrat hydrophobe.

d'impact et qu'elle décroît ensuite exponentiellement dans le temps caractéristique $t^* = tU/D_0$. Les ordres de vitesse, que nous obtenons, pour le déplacement de la ligne de contact sont en accord avec les quelques résultats existants dans la littérature [2,25]. Il faut néanmoins remarquer que les résultats donnés par Pasandideh-Fard et al. se limitent à des temps courts et l'on n'observe pas l'établissement de l'angle d'équilibre. Dans ce travail, nous avons cherché à lier l'angle apparent de contact à la vitesse sous la forme d'une loi puissance donné sous la forme ci-dessous :

$$\theta_{cal} - \theta_{eq} = aV^n \quad (5)$$

La Fig. 9 compare les angles apparents mesurés et ceux calculés en utilisant l'Éq. (5) par une méthode d'optimisation. On constate que l'accord est tout à fait acceptable pour une valeur de $n = 1/3$ et un coefficient $a = 27,34$ en ce qui concerne le substrat hydrophobe. Les mêmes essais effectués avec le substrat hydrophile donne toujours pour le même coefficient de loi puissance n , un pré-facteur a , proche de 80. L'accord n'est pas aussi bon que pour le substrat hydrophobe

et plusieurs raisons peuvent expliquer cela : la valeur plus faible de l'angle d'équilibre du substrat hydrophile où toute variation même faible de la vitesse terminale de la ligne de contact peut creuser un écart non négligeable entre la valeur calculée et la valeur expérimentale ou encore des phénomènes plus complexes lors de l'étalement sur ce type de substrat.

D'autres travaux sont en cours en changeant les fluides et les substrats et devraient permettre, d'une part de comprendre les interactions sur différents types de substrat, d'autre part d'améliorer l'accord entre les expériences et les résultats numériques en imposant dans la simulation l'angle dynamique de contact.

4.4. Substrats jet d'encre et impacts de micro-gouttes

L'impression par jet d'encre et plus particulièrement la méthode basée sur la goutte à la demande [14] est devenue la technologie dominante en terme d'impression digitale grâce à ses nombreuses possibilités. Les défis à relever,

Fig. 10. Différentes phases d'étalement de micro-gouttes sur des substrats jet d'encre.

en termes de substrat, sont de concevoir des papiers qui tout en limitant l'extension radiale de la tache permettent une imbibition rapide afin d'augmenter la cadence de production tout en maintenant une excellente qualité d'impression [29]. La Fig. 10 montre la variation du diamètre au cours du temps pour des gouttes éjectées d'une tête d'impression goutte à la demande, ayant un diamètre initial proche de 29 micromètres, et impactant soit sur un papier avec une couche gélatineuse soit sur un papier microporeux [17,24, 29]. On distingue tout d'abord une augmentation rapide du diamètre dans la première dizaine de microsecondes suivi par un plateau, où existe sans doute une compétition d'effets cinématiques et capillaires [13], et de nouveau une croissance avec une pente beaucoup plus faible qui est en corrélation avec les théories existantes [19,20]. Cette dernière pente est d'ailleurs quantitativement différente entre le substrat gélatineux et le microporeux ce qui témoigne d'une influence de la surface comme c'est montrée par ailleurs [24]. La pente de la croissance initiale du diamètre, quant à elle, est non seulement indépendante du substrat mais également de la taille des gouttes, puisque nous retrouvons le même comportement sur les Figs. 6(a) et 7(a) pour des gouttes de plus grande taille. C'est la première fois dans la littérature que cette correspondance de mécanismes entre gouttes de tailles différentes est montrée de façon concluante et ceci devrait permettre d'étendre tous les résultats obtenus sur des gouttes macroscopiques aux micro-gouttes en respectant les nombres adimensionnels pertinents.

5. Conclusions et perspectives

Dans ce papier, nous avons d'abord étudié expérimentalement la dynamique de collision d'une goutte de liquide avec divers substrats. Pour cela, nous avons mis en place une

maquette originale comportant différents dispositifs d'éjection de gouttes et des moyens de visualisation à base de caméra rapide et de pseudo-cinématographie à déphasage contrôlé. Les photos obtenues ont été analysées avec un logiciel de traitement d'images pour obtenir les hauteurs et les diamètres de micro-gouttes lors de l'étalement inertiel.

Nous avons ensuite modélisé les phénomènes suivant deux étapes. La première qui est celle de l'étalement initial où l'utilisation de la conservation d'énergie permet de prédire la tache maximale atteinte avec un assez bon accord avec les expériences. La seconde étape est la phase dynamique de l'étalement où nous avons montré que le modèle de la sphère tronquée, justifié dans le cas particulier de fluides ayant une basse tension superficielle et mouillant bien le substrat, permet de modéliser assez correctement non seulement les variations de diamètre et de hauteur en fonction du temps mais également des phénomènes tels que le mouvement des oscillations de gouttes grâce à l'introduction de paramètres pertinents.

Dans une dernière partie, nous avons tout d'abord caractérisé le comportement fin de l'étalement de gouttes macroscopiques en donnant des lois de variation de l'angle de contact dynamique apparent en fonction du temps avant de relier l'angle de contact à la vitesse instantanée de la ligne de contact. Nous avons ensuite détaillé le comportement de micro-gouttes sur deux différents substrats industriels en montrant tout d'abord les similarités avec les gouttes macroscopiques sur l'étalement court (inertiel) avant de décrire les compétitions d'effets cinématiques et capillaires précédant une phase d'étalement longue (capillaire) où les interactions entre le fluide et la surface sont capitales.

Tant pour les essais expérimentaux que pour la modélisation, nous n'avons considéré jusqu'à maintenant que l'impact d'une seule goutte. Ceci est loin de représenter la situation industrielle et nous avons très récemment commencé à

étudier le comportement de plusieurs gouttes, avec notamment la prise en compte de la coalescence. Enfin, le procédé du jet d'encre sur un substrat poreux ne se limite pas aux étalements d'abord inertiel et ensuite capillaire. Il comporte également comme étapes l'absorption et l'évaporation qui sont responsables de l'effet final de l'impression. L'étude de ces phénomènes nécessite la mise en place d'autres montages expérimentaux, des essais longs et élaborés et des modèles bien spécifiques pour chacune des phases, qui d'après nos expériences préliminaires, se passent à des échelles de temps très différentes.

Remerciements

G.D. et A.S. remercient respectivement l'Institut voor de aanmoediging van innovatie door Wetenschap en Technologie in Vlaanderen (IWT, Belgique) et le Ministère de la Recherche et des Nouvelles Technologies (MNRT, France) pour leur soutien financier de ce travail à travers le projet Σ!2911 PRODIJ.

Références

- [1] A.M. Worthington, On the forms assumed by drops of liquid falling on a horizontal plate, *Proc. Roy. Soc. London* 25 (1877) 26.
- [2] G. Engel, Waterdrop collisions with solid surfaces, *J. Res. Natl. Bur. Stand.* 54 (1955) 281–298.
- [3] C.D. Stow, M.G. Hadfield, An experimental investigation of fluid flow resulting from the impact of a water drop with an unyielding dry surface, *Proc. Roy. Soc. London A* 373 (1981) 419–441.
- [4] S. Chandra, C.T. Avedisian, On the collision of a droplet with a solid surface, *Proc. Roy. Soc. London A* 432 (1991) 13.
- [5] K. Range, F. Feuillebois, Influence of surface roughness on liquid drop impact, *J. Colloid Interface Sci.* 203 (1998) 16–30.
- [6] H.Y. Kim, Z.C. Fen, J.H. Chun, Instability of a liquid jet emerging from a droplet upon collision with a solid surface, *Phys. Fluids* 12 (2000) 531–541.
- [7] A. Rozhkov, B. Prunet-Foch, M. Vignes-Adler, Impact of water drops on small targets, *Phys. Fluids* 14 (2002) 3485–3501.
- [8] I.V. Roisman, C. Tropea, Impact of a drop onto a wetted wall: description of crown formation and propagation, *J. Fluid Mech.* 472 (2002) 373–397.
- [9] A. Asai, M. Shiota, S. Hirasawa, T. Okazaki, Impact of an ink drop on paper, *J. Imaging Sci. Technol.* 37 (1993) 205–207.
- [10] J. Heilmann, U. Lindqvist, Effect of drop size on the print quality in continuous ink jet printing, *J. Imaging Sci. Technol.* 44 (2000) 491–494.
- [11] J. Heilmann, U. Lindqvist, Significance of paper properties on print quality in continuous ink jet printing, *J. Imaging Sci. Technol.* 44 (2000) 495–499.
- [12] M. Rein, Phenomena of liquid drop impact on solid and liquid surfaces, *Fluid Dyn. Res.* 12 (1993) 61–93.
- [13] B. Lopez, A. Soucemarianadin, P. Attané, Break-up of continuous liquid Jets: effect of nozzle geometry, *J. Imaging Sci. Technol.* 43 (1999) 145–155.
- [14] B. Lopez, D. Vadillo, P. Pierron, A. Soucemarianadin, Transient phenomena during drop formation in drop on demand printing, in: *Proceedings of IS&T's NIP18: Int. Conf. on Digital Printing Technologies*, San Diego, USA, 2002, pp. 170–175.
- [15] S.E. Bechtel, D.B. Boggy, F.E. Talke, Impact of a liquid drop against a flat surface, *IBM J. Res. Develop.* 25 (1981) 963–971.
- [16] H.Y. Kim, J.H. Chun, The recoiling of liquid droplets upon collision with solid surfaces, *Phys. Fluids* 13 (2001) 643–659.
- [17] G. Desie, S. Allaman, O. Lievens, K. Anthonissen, A. Soucemarianadin, Influence of substrate properties in drop on demand printing, in: *Proceedings of IS&T's NIP18: Int. Conf. on Digital Printing Technologies*, San Diego, USA, 2002, pp. 360–365.
- [18] S. Allaman, Rapport intermédiaire de Diplôme de Recherche Technologique, Université Joseph Fourier, Grenoble, France, 2002.
- [19] P.G. de Gennes, Wetting: statics and dynamics, *Rev. Mod. Phys.* 57 (1985) 827–863.
- [20] M.J. de Ruijter, M. Charlot, M. Voué, J. De Coninck, Experimental evidence of several time scales in drop spreading, *Langmuir* 16 (2000) 2363–2368.
- [21] F.M. White, *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill, New York, 1986.
- [22] M. Pasandideh-Fard, Y.M. Qiao, S. Chandra, J. Mostaghimi, Capillary effects during droplet impact on a solid surface, *Phys. Fluids* 8 (1996) 650–659.
- [23] S. Middleman, *Modeling Axisymmetric Flows*, Academic Press, San Diego, 1995.
- [24] G. Desie, S. Allaman, D. Vadillo, A. Soucemarianadin, article soumis à *J. Imaging Sci. Technol.*, 2003.
- [25] J. Fukai, Z. Zhao, D. Poulikakos, O. Miyatake, Modeling of the deformation of a liquid droplet impinging upon a flat surface, *Phys. Fluids A* 5 (1993) 2588–2599.
- [26] M. Bussmann, J. Mostaghimi, S. Chandra, On a three-dimensional volume tracking model of droplet impact, *Phys. Fluids* 11 (1999) 1406–1417.
- [27] J. Fukai, Y. Shiiba, T. Yamamoto, O. Miyatake, D. Poulikakos, C.M. Megaridis, Z. Zhao, Wetting effects on the spreading of a liquid droplet colliding with a flat surface: Experiment and modeling, *Phys. Fluids* 7 (1995) 236–247.
- [28] D. Quéré, J. Bico, Modulation du mouillage par des microtextures, in: *Proceedings du Colloque Microfluidique*, Toulouse, France, 2002, pp. 3–10.
- [29] S. Allaman, G. Desie, A. Soucemarianadin, Liquid absorption into porous surfaces during drop on demand printing, in: *Proceedings of the 11th International Printing and Graphics Arts Conference – IPGAC*, Bordeaux, France, 2002, pp. II5–II13.