

# La physique de la pluie conditionne la propagation des maladies en agriculture

Tristan Gilet<sup>(1)</sup> (Tristan.Gilet@ulg.ac.be) et Lydia Bourouiba<sup>(2)</sup> (lbouro@mit.edu)

(1) Microfluidics Lab., Bât. B52/3, Université de Liège, Quartier Polytech 1, Allée de la découverte 9, B-4000 Liège, Belgique

(2) The Fluid Dynamics of Disease Transmission Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA-02139, USA

Les maladies qui affectent le feuillage des plantes agricoles ont des impacts économique et humain considérables, que les pesticides et les modifications génétiques ne suffisent pas à éliminer. La transmission de ces maladies reste une zone d'ombre critique. Pourrions-nous comprendre à quelle vitesse les pathogènes passent d'une plante à l'autre ? Nous nous sommes intéressés ici au mécanisme dominant la propagation des pathogènes : la pluie. Comment la pluie interagit-elle avec le feuillage ? Jusqu'où ses éclaboussures peuvent-elles transporter les pathogènes ? Les réponses à ces questions sont conditionnées par les lois de la physique, et en particulier par celles des liquides à l'échelle d'une goutte.

Les maladies des plantes agricoles restent responsables de la perte d'environ 15% de nos récoltes, en moyenne à l'échelle mondiale [1]. Virus, bactéries et champignons s'attaquent directement au feuillage et mettent en péril le développement de la plante. Si certains types de rouille (infections foliaires sous la forme de champignons) réapparaissent maintenant, ils pourraient dévaster près d'un tiers des récoltes de blé [2]. Les épidémies foliaires ont souvent été observées juste après des épisodes de pluie, et une corrélation statistique a pu être établie entre ces deux phénomènes [3]. L'explication la plus plausible tient au fait que les pathogènes sont entourés d'un mucilage, une substance relativement visqueuse composée de glucides complexes solubles dans l'eau, que l'on retrouve à la surface des feuilles infectées. Le vent seul ne peut alors déloger les pathogènes. En revanche, la pluie peut dissoudre ce mucilage, et emporter les pathogènes logés sur les feuilles vers les plantes voisines, au rythme des éclaboussures.

Ces mécanismes d'éclaboussures sont très complexes à décrire, et font l'objet de nombreuses questions ouvertes pour les physiciens [4]. Les études entreprises jusqu'ici par les phytopathologistes (spécialistes des maladies des plantes) et les ingénieurs agronomes [3] ont toujours analysé la dispersion de pathogènes comme une boîte noire, à l'échelle d'une averse sur une plante. Elles ont quantifié la probabilité qu'une plante voisine soit infectée, notamment en fonction de l'intensité de l'averse, définie comme le volume de pluie tombant sur

une surface donnée en un certain temps. Les lois empiriques découlant de ces études ne sont malheureusement pas robustes, et elles ne peuvent être valablement utilisées comme prédictions. En effet, les subtiles interactions entre la pluie, les feuilles et les pathogènes ne peuvent pas se résumer à ce seul paramètre d'intensité [5].

Dans cette étude, nous avons ouvert cette boîte noire, pour comprendre physiquement comment une goutte de pluie impacte sur une feuille, et jusqu'où celle-ci est capable d'éjecter les pathogènes délogés.

## Des éclaboussures d'eau contaminée

Les impacts successifs de la pluie sur une même feuille peuvent laisser des perles d'eau (encadré 1), qui ont alors le temps de dissoudre le mucilage et de déloger les pathogènes. Que leur arrive-t-il ensuite ?

La caméra rapide sous le bras (encadré 2, p. 7), nous avons affronté l'averse pour filmer des impacts de pluie sur des plantes agricoles. Invariablement, des perles d'eau sont laissées sur les feuilles par les premiers impacts. Ces perles, potentiellement contaminées, sont ensuite expulsées et fragmentées dès qu'une autre goutte impacte à proximité, sur la même feuille [8]. Pour plus de confort, nous avons reproduit ce scénario en laboratoire, en concevant un modèle expérimental. Nous avons placé une perle de liquide coloré sur une feuille (le colorant représente ici la contamination), et nous avons lâché dans son voisinage une goutte d'eau pure, similaire aux plus





Une goutte de pluie impactant sur une feuille (à l'endroit désigné par la flèche dans la partie gauche de l'image) peut éjecter de l'eau contaminée vers la plante voisine. La partie droite de l'image correspond à une superposition d'instantanés capturés toutes les 5 millisecondes, où l'on voit apparaître les trajectoires balistiques des goutelettes éjectées.

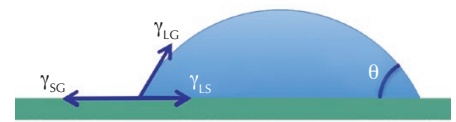
### ► Pourquoi l'eau forme-t-elle de petites perles sur les feuilles ?

encadré 1

Chaque interface entre deux milieux (solide/liquide/gaz) a un coût énergétique proportionnel à son aire. Ainsi, la tension de surface de l'eau dans l'air,  $\gamma = 0,072 \text{ J/m}^2$ , indique qu'il faut 0,072 joules pour former une interface de  $1 \text{ m}^2$  entre l'eau liquide et l'air. Si ce coût nous semble dérisoire, il est nettement plus significatif (et donc influent) aux échelles submillimétriques, et il permet ainsi à certains insectes de marcher sur l'eau<sup>(a)</sup>. Lorsqu'une goutte d'eau est déposée sur une feuille, son énergie résulte des contributions des trois interfaces : liquide/solide  $\gamma_{LS}$ , liquide/gaz  $\gamma_{LG}$  et solide/gaz  $\gamma_{SG}$ . Sur une surface dite parfaitement mouillante, l'énergie de l'interface solide/gaz est plus élevée que la somme des deux autres. Il est ainsi énergétiquement avantageux que l'eau s'étale de tout son long, sous forme d'un mince film liquide. Sur des surfaces moins mouillantes, le liquide prend plutôt la forme d'une perle. L'angle avec lequel l'interface liquide/air rejoint la surface solide, appelé angle de contact  $\theta$ , résulte de l'équilibre énergétique des trois interfaces (fig. E1) [6].

L'expérience quotidienne nous apprend que les feuilles de plantes ne sont généralement pas très mouillantes, certaines étant même recouvertes de cire. Dans ces conditions, il est improbable que des films d'eau puissent se développer sur les feuilles, et les résidus d'eau prennent plus fréquemment la forme de perles [7]. En effet, nous avons mesuré les angles de contact sur une dizaine de plantes communes choisies au hasard : ils étaient systématiquement compris entre  $40^\circ$  et  $130^\circ$ .

Les perles de dimensions inférieures au millimètre sont des calottes sphériques. Les plus grosses sont davantage aplaties. Si les perles s'accumulent pendant une averse, ne peuvent-elles pas former une perle géante sur la feuille ? Non ! Les perles ont une taille maximale de quelques millimètres (fig. E2). En effet, à moins que la feuille ne soit parfaitement horizontale et infiniment rigide, les perles risquent toujours de la dévaler, victimes de leur propre poids. C'est à nouveau la tension de surface qui les en empêche : elle agit ici comme une force par unité de longueur qui équilibre le poids et maintient la perle en place. Une perle de rayon  $R_1$  génèrera donc une force d'adhésion de l'ordre de  $\gamma \cdot R_1$ , alors que le poids est de l'ordre de  $\rho \cdot g \cdot R_1^3$  ( $\rho$  est la masse volumique de l'eau). Ainsi, seules les perles de taille inférieure à environ  $\lambda = (\gamma / \rho g)^{1/2}$  éviteront de glisser. Cette longueur caractéristique maximale  $\lambda$ , appelée longueur capillaire, est égale à 2,7 mm pour l'eau [6]. Voilà pourquoi il n'y a pas de perle d'eau de 4 cm !



E1. Définition de l'angle de contact  $\theta$ . Les tensions de surface  $\gamma_{SG}$ ,  $\gamma_{LG}$  et  $\gamma_{LS}$  qui sont des forces par unité de longueur (et donc des vecteurs), sont orientées tangentiellement aux interfaces.



E2. À la suite d'une averse simulée sur une feuille de menthe poivrée, l'eau résiduelle prend la forme de perles de quelques millimètres de diamètre au plus.

(a) Si l'insecte s'enfonçait dans l'eau, il diminuerait son énergie potentielle de gravitation en abaissant son centre de masse. Mais il augmenterait également l'énergie de surface en déformant l'interface eau/air lors de la pénétration de ses pattes hydrophobes. À l'échelle de l'insecte, l'énergie de surface domine le bilan énergétique. Ainsi, pour que l'énergie totale soit minimale, il faut que l'insecte ne s'enfonce quasiment pas.



**1. Interaction directe : une perle d'eau contaminée (colorée en rouge) sur une feuille de palmier *Areca* est fragmentée directement par l'impact d'une goutte de pluie juste à côté.** La première image est prise 2 ms avant impact. Les autres images sont prises à 2 ms, 4 ms, 7 ms et 11 ms après impact.



grosses gouttes de pluie en taille et en vitesse (encadré 2). Nous avons enfin considéré plusieurs feuilles de plantes différentes, ainsi que des feuilles artificielles en plastique, de mouillabilité constante, à la géométrie et aux propriétés mécaniques (module de flexion) mieux contrôlées [9].

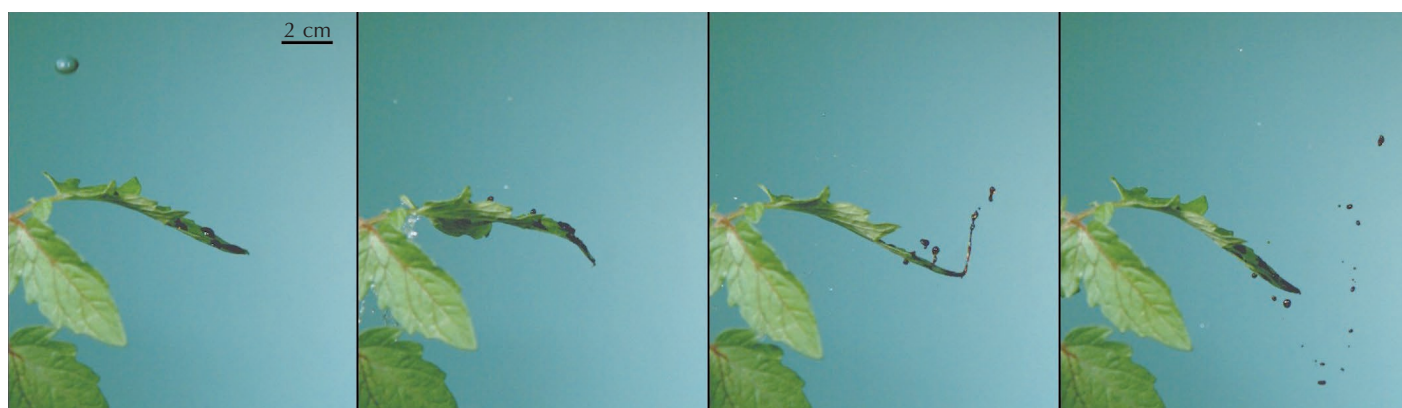
Une goutte qui impacte près d'une autre goutte sur une feuille qui peut se plier, cela représente beaucoup de paramètres physiques à considérer. Et malheureusement, dans les champs Dame Nature les varie quasiment tous en même temps. Les éclaboussures sont donc éjectées d'une multitude de façons. Seuls les scénarios d'éjection fréquents et efficaces ont retenu notre attention. On en distingue deux types : l'interaction directe, et l'interaction indirecte, *via* le feuillage.

Lors d'une interaction directe, la goutte de pluie impacte juste à côté de la perle, et la chasse en s'étalant (fig. 1). Percutée, la perle s'étire alors sous la forme d'une nappe liquide, qui se fragmente en petites gouttelettes éjectées à grande vitesse.

L'interaction indirecte se produit typiquement lorsque la goutte de pluie impacte trop loin de la perle pour la toucher (fig. 2). Si la feuille est suffisamment petite et flexible, elle fléchit en réponse à l'impact. La perle doit suivre ce mouvement, et subir les accélérations qui en résultent. Si ces dernières sont suffisantes, la perle peut se détacher de la feuille par inertie. Elle s'étire sous forme d'un filament qui finit par se fragmenter.

### Limite physique des éclaboussures

Jusqu'où peuvent aller les éclaboussures ? Pour déterminer cette limite, nous avons enregistré la vitesse  $u$  et le rayon  $r$  des gouttelettes éjectées lors des scénarios direct et indirect explicités ci-dessus. Nous avons considéré une dizaine de feuilles aux propriétés différentes (géométrie, masse, flexibilité). Nous avons systématiquement fait varier la distance entre le point d'impact de la goutte de pluie et la position initiale de la perle contaminée, cette dernière étant placée entre le point d'impact et le bord de la feuille. Les rayons de la perle ( $R_1 = 1,4$  mm) et de la goutte de pluie ( $R_0 = 2,4$  mm), ainsi que la vitesse de cette dernière quand elle impacte la feuille

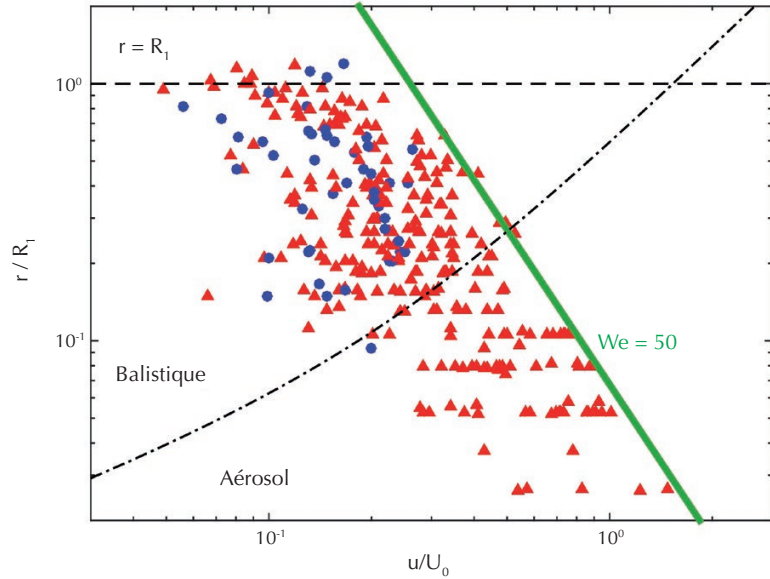


**2. Interaction indirecte : une goutte de pluie impacte au bord d'une feuille de tomate ; à l'autre bout de cette feuille, une perle d'eau contaminée répond aux oscillations de la feuille en se fragmentant.** La première image est prise 5 ms avant impact. Les autres images sont prises à 10 ms, 30 ms, et 50 ms après impact.

( $U_0 = 6 \text{ m/s}$ ) ont été maintenues constantes. La figure 3 illustre nos résultats, et prouve qu'il existe en effet une vitesse maximale d'éjection diminuant de façon inversement proportionnelle à la racine carrée de la taille des gouttelettes éjectées. Ainsi, cette borne correspond à un nombre de Weber de 50, défini cette fois sur la base de la taille et de la vitesse de la gouttelette éjectée :  $We = (\rho u^2 r) / \gamma$ .

La figure 3 illustre également la distinction entre gouttelettes balistiques et aérosols, basée sur l'influence relative du poids ( $\sim \rho g r^3$ ) et des frottements de l'air. Ces frottements comprennent une contribution due à l'inertie de l'air et une contribution due à sa viscosité. Le rapport de ces contributions est approximativement donné par le nombre de Reynolds  $Re = 2 \rho_a u r / \mu_a$ , où  $\mu_a$  et  $\rho_a$  sont respectivement la viscosité dynamique et la densité de l'air. Ici, pour toutes les gouttelettes observées, le nombre de Reynolds est compris entre 5 et 100, et les frottements sont donc légèrement dominés par l'inertie de l'air. Il existe une loi empirique [10] dans ce régime de nombre de Reynolds, qui prédit une force de frottement égale à  $\mu_a r u (1 + 0,15 Re^{0,687})$ . L'importance des frottements par rapport au poids est donc déterminée par le rapport sans dimension

$\rho g r^2 / [\mu_a u (1 + 0,15 Re^{0,687})]$ . Cette formule est utilisée pour estimer l'importance des frottements dans les données de la figure 3. Les plus grosses gouttelettes sont dites balistiques, car elles



**3. Vitesse limite d'éjection des éclaboussures.** Rayon des gouttelettes éjectées  $r$  (normalisé par le rayon de la perle  $R_1$ ) en fonction de leur vitesse d'éjection  $u$  (normalisée par la vitesse de la goutte de pluie  $U_0$ ). (▲) : éjections directes. (●) : éjections indirectes. Toutes les expériences (différentes feuilles, différentes distances entre les deux gouttes initiales) sont représentées. La ligne en tiret-point correspond à la vitesse à laquelle les forces de frottement dans l'air sont de même intensité que le poids. La ligne verte épaisse représente la limite  $We = 50$ .

sont dominées par leur poids. Elles sont relativement insensibles aux frottements de l'air, et elles rejoignent donc les feuilles voisines en suivant des trajectoires presque paraboliques. Par opposition, les gouttelettes d'aérosol sont si petites que les frottements de l'air dominent leur trajectoire dès l'éjection. En atmosphère calme, ces gouttes sont freinées et elles ne se propagent

pas au-delà de 20 cm. En revanche, la moindre brise peut les emporter. Leur taille inférieure à  $200 \mu\text{m}$  leur permet de s'évaporer très vite en vol, jusqu'à ce qu'il ne reste que le résidu pathogénique. Les aérosols peuvent ainsi amener les pathogènes directement dans le champ voisin, voire bien au-delà. Par contre, le nombre de pathogènes arrivant sur une même plante risque d'être extrêmement faible, et il est peu probable que la plante n'arrive à s'en défendre. À ce sujet, les gouttelettes balistiques sont probablement plus dangereuses, car elles expédient un plus grand nombre de pathogènes au même endroit.

En connaissant la vitesse maximale d'éjection possible (correspondant à  $We = 50$ ), on peut utiliser les lois de Newton pour calculer la distance maximale  $x$  que des gouttelettes de rayon  $r$  peuvent parcourir avant d'atterrir 50 cm plus bas, et ce en considérant les frottements de l'air. Pour des gouttes de  $500 \mu\text{m}$  de rayon, cette distance atteint un maximum de plus de 70 cm ; de quoi transporter de nombreux pathogènes sur la plante voisine. Sur la figure 4, nous avons comparé cette prédiction à la distribution des éclaboussures collectées au sol après une centaine d'impacts sur une même feuille. Les gouttelettes ne se propagent pas au-delà de cette distance maximale prédite.

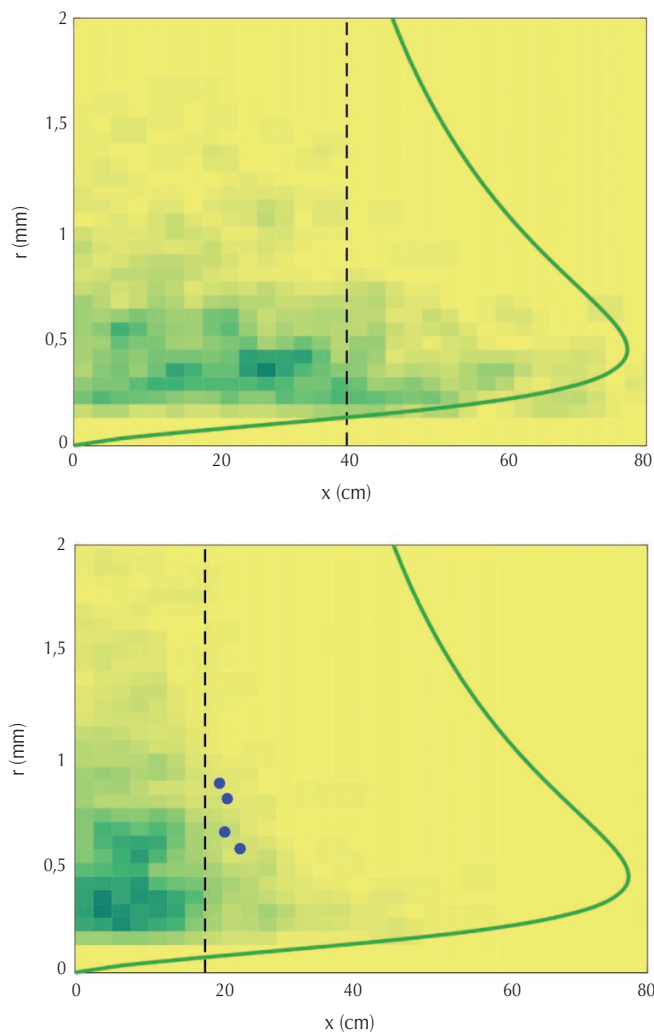
### ► Échelles caractéristiques d'un impact

encadré 2

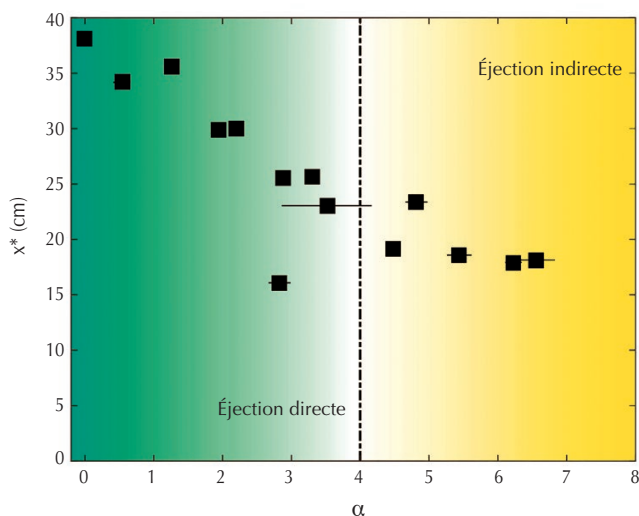
Lorsqu'une goutte de pluie de rayon  $R_0$  et de vitesse  $U_0$  s'écrase sur un substrat, son énergie cinétique est en partie transformée en énergie de surface [6]. Pour quantifier la force de l'impact, on définit le nombre sans dimension de Weber :  $We_0 = (\rho U_0^2 R_0 / \gamma)$ . Il s'agit du rapport entre l'énergie cinétique ( $\sim \rho U_0^2 R_0^3$ ) et l'énergie de surface initiale ( $\sim \gamma R_0^2$ ) de la goutte de pluie. Si ce nombre est beaucoup plus grand que l'unité, la goutte se déforme fortement et peut se fragmenter en de multiples gouttelettes. En supposant que  $N$  gouttelettes de même volume soient créées, leur surface totale est égale à la surface de la goutte initiale multipliée par  $N^{1/3}$ . Fragmenter une goutte crée donc de l'énergie de surface. Plus le nombre de Weber est grand, plus la goutte initiale peut s'offrir le coût énergétique de cette fragmentation avec son budget d'énergie cinétique initiale. Les plus grosses gouttes de pluie font environ 3 mm de rayon et elles atteignent le sol à 9 m/s, ce qui correspond à  $We_0 \sim 3400$ . Ces gouttes ont donc toutes les chances d'engendrer des éclaboussures.

Le nombre de Weber peut aussi se définir comme  $We_0 = (U_0 / U_\gamma)^2$ , où apparaît alors une vitesse caractéristique liée à la tension de surface, la vitesse capillaire  $U_\gamma = (\gamma / \rho R_0)^{1/2}$ . Cette vitesse est caractéristique de l'évolution des nappes et filaments liquides lors de la fragmentation ; elle est ici de l'ordre de 0,15 m/s. Le temps caractéristique  $R_0 / U_\gamma$  de fragmentation à l'échelle de la goutte (3 mm) est donc environ 20 ms. Ceci explique pourquoi il est nécessaire de recourir aux caméras rapides (plusieurs milliers d'images par seconde) pour capturer ce phénomène.





**4. Distribution de probabilité de la distance parcourue par les gouttes éjectées depuis une feuille horizontale rigide (a) et depuis une feuille flexible (b).** Le niveau de vert représente la probabilité qu'une goutte éjectée de rayon  $r$  puisse se déposer à une distance  $x$  de la feuille, 50 cm plus bas. La ligne verte représente la limite hydrodynamique  $We = 50$  discutée ci-dessus. Les points bleus sur la figure 4b représentent les gouttes éjectées indirectement qui se propagent le plus loin. Les lignes verticales en tirets représentent la distance  $x^*$  que seul 10% du volume éjecté parvient à dépasser.



**5. Variation de la distance de propagation  $x^*$  (mesurée sur les diagrammes de la figure 4) avec le paramètre  $\alpha$ , pour une dizaine de feuilles différentes.** La région verte est dominée par l'éjection directe, et la jaune par l'éjection indirecte. La ligne en tiret-point représente le seuil d'apparition des éjections indirectes.

>>>

En revanche, sur les feuilles les plus à même de fléchir et d'osciller, elles n'atteignent pas la moitié de cette distance ! Dans ce cas, ce sont les gouttelettes éjectées indirectement qui vont le plus loin. Le mouvement des feuilles joue donc un rôle primordial sur les éclaboussures.

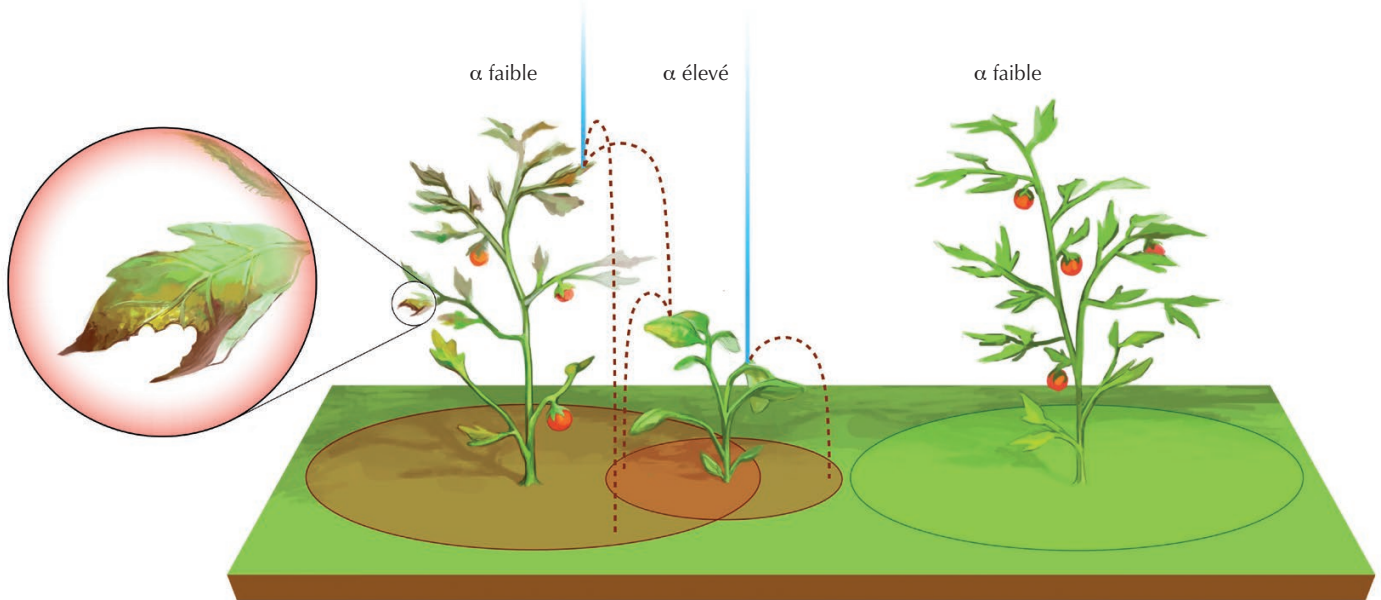
## Effets des mouvements de la feuille

Pour quantifier l'effet des mouvements de la feuille, nous définissons le paramètre sans dimension  $\alpha$  comme le rapport entre la vitesse locale de la feuille (où se situe la perle) et la vitesse de fragmentation  $U_f$  basée sur le rayon  $R_1$  de la perle (encadré 2). Cette vitesse de fragmentation est ici de l'ordre de 0,4 m/s, alors que la vitesse locale peut être estimée entre 0,2 et 2,9 m/s selon la feuille, sur la base d'un modèle mécanique de la feuille qui considère la conservation du moment angulaire lors du choc. Le paramètre  $\alpha$  varie donc ici de 0,5 à 7. Les grandes valeurs de  $\alpha$  correspondent à des feuilles petites et flexibles, qui bougent vigoureusement lors d'un impact.

L'effet de  $\alpha$  sur les éclaboussures peut être quantifié par l'intermédiaire de la distance  $x^*$  au-delà de laquelle on observe moins de 10% du volume total éjecté. La figure 5 montre que cette distance décroît de plus d'un facteur 2 lorsque  $\alpha$  augmente. Pour  $\alpha < 4$ , les éjections indirectes sont absentes, alors que l'éjection directe disperse les pathogènes très efficacement. En revanche, pour  $\alpha > 4$ , l'éjection directe perd fortement en vigueur alors que l'éjection indirecte, rendue possible, domine la dispersion.

## Perspectives

Les éclaboussures de la pluie sont donc responsables de la propagation des maladies foliaires, notamment en agriculture. Les lois physiques régissent ce mécanisme d'épidémie et en imposent les limites. De nombreux paramètres physiques ont un effet significatif qui doit être finement caractérisé. En particulier, nous avons ici montré que la géométrie et les propriétés mécaniques (flexibilité) des feuilles conditionnent fortement la dispersion des pathogènes [9]. La distance parcourue peut varier de 30 cm à près de 80 cm ! Pour un champ en monoculture intensive, où les plantes sont très peu espacées, cela fait plus que doubler la vitesse de propagation de l'épidémie de proche en proche.



6. Un feuillage dont le paramètre  $\alpha$  est élevé peut faire écran et empêcher le transport des pathogènes entre deux plantes de paramètre  $\alpha$  plus faible.

Ceci veut dire également que le risque épidémique est plus faible pour de jeunes plantes aux petites feuilles ( $\alpha$  grand) que pour des plantes matures ( $\alpha$  petit). Ce résultat pourrait être considéré dans le cadre d'une planification plus raisonnée des épandages de pesticides. De plus, si l'on peut mélanger les cultures, il est alors possible que des plantes dont le feuillage propage peu ( $\alpha$  grand) soient utilisées comme écrans entre des plantes plus à risque ( $\alpha$  faible), afin de confiner naturellement toute épidémie (fig. 6). Serait-ce en partie pour cette raison que la polyculture semble afficher une meilleure résistance aux maladies que la monoculture intensive ? [11] ■

### Bibliographie

- 1• P.E. Hulme, "An Introduction to Plant Biosecurity: Past, Present and Future", Chapter 1 in *The handbook of Plant Biosecurity* (eds. G. Gordh et S. Mckirdy), pp. 1-27, Springer (2014).
- 2• "Rust in the bread basket", *The Economist*, 1<sup>er</sup> juillet 2010, pp. 4-7. ([www.economist.com/node/16481593](http://www.economist.com/node/16481593)).
- 3• L. Huber, H.A. McCartney et B.D.L. Fitt, "Environmental biophysics applied to the dispersal of fungal spores by rain-splash", Chapter 16 in *The epidemiology of plant diseases* (eds B.M. Cooke, D. Gareth-Jones et B. Kaye), pp. 417-444, Springer (2006).
- 4• E. Villermaux et B. Bossa, "Drop fragmentation on impact", *J. Fluid Mech.* **668** (2011) 412-435.
- 5• S. Saint-Jean *et al.*, *Agric. Forest Meteorol.* **141** (2006) 257-262.
- 6• P.G. de Gennes, F. Brochard-Wyart et D. Quéré, *Gouttes, Bulles, Perles et Ondes*, Belin (2002)
- 7• S. Vogel, *The life of a leaf*, University of Chicago Press (2012).
- 8• T. Gilet et L. Bourouiba, *Integr. Comp. Biol.* **54** (2014) 974.
- 9• T. Gilet et L. Bourouiba, "Fluid fragmentation shapes rain-induced foliar disease transmission", *J. R. Soc. Interface* **12** (2015) 20141092.
- 10• R. Clift, J.R. Grace et W.E. Weber, *Bubbles, drops and particles*, New York Academic (1978).
- 11• M.S. Wolfe, "Crop strength through diversity", *Nature* **406** (2000) 681-682.