SUIVI DE L'EFFET D'UNE POLLUTION FLUORÉE SUR LA VIGNE

FOLLOW-UP OF FLUORINE POLLUTION EFFECT ON GRAPEVINE

F. BEN ABDALLAH*, N. ELLOUMI, M. GHRAB et M. BOUKHRIS

Faculté des Sciences de Sfax, Département des Sciences de a vie
B.P. 802, 3018 La Soukra Sfax, Tunisie

Résumé : Les effets de la pollution atmosphérique sur trois vignes locales, Asli, Jerbi et Tounsi cultivées aux environs d'une usine de production d'engrais phosphatés, se traduisent par l'apparition sur les feuilles et les fruits de nécroses caractéristiques des composés fluorés. L'analyse des zones nécrosées nous a permis de répartir les vignes rencontrées en classe de sensibilité. Le suivi spatio-temporel, au cours des différentes saisons, de la conductance stomatique et de la teneur en F- foliaires nous a permis d'explorer quelques stratégies adaptatives permettant à ces vignes d'éviter l'agression des polluants et de survivre dans ces conditions contraignantes. Etant donné que le fluor est un élément étranger à son métabolisme, la vigne tend à l'accumuler, grâce à un mécanisme de concentration externe, dans les zones apicales et marginales. Les zones nécrosées sont délimitées par un liseré de transition de couleur brune permettant à la plante non seulement d'éviter la toxicité du fluor mais aussi de garder une grande surface assimilatrice. En plus, des possibilités d'exclusion du fluor, de compartimentation vacuolaire, de fermeture temporaire des stomates et du piégeage du fluor sous forme de CaF2, SiF4 sont également à considérer. Il apparaît aussi que les feuilles de vigne arrivées à maturité peuvent constituer un outil efficace pour évaluer l'impact d'une pollution fluorée sur la végétation. La contamination des baies semble se faire directement par les fumées de l'usine, et non par apport endogène. De même, par ses nécroses marginales caractéristiques, la vigne peut être considérée une plante bioindicatrice d'une pollution fluorée et, par voie de conséquence, utilisée dans la cartographie de la pollution d'une région donnée.

Abstract : Effects of atmospheric pollution on three local grapevines, Asli, Jerbi and Tounsi, growing in the vicinity of a phosphate fertiliser factory, consist of an exhibition of characteristic necrosis on leaves and fruits. Analysis of necrotic leaf areas allowed us to distribute local vines into sensitivity classes. The follow-up, in function of time and space, of stomatal conductance and leaf fluoride content during the different seasons allowed us to reveal some offensive strategies allowing these vines to escape from pollutants toxicity and maintaining its vitality. Therefore, giving that fluorine is strange to its metabolism, grapevine tends to accumulate it, thanks to an external concentration mechanism, in the tips and leaf margins. Necrotic areas are delimited by a narrow brown border line. Thus, allowing the plant not only to avoid F^- toxicity, but also to keep a big assimilation surface. In addition, possibilities as F^- excluding, F^- vacuol partitioning, temporary closing of stoma, F- trapping as CaF2, SiF4 are also to be considered.
By another way, our results seem to show that full mature grapevine leaves may constitute an efficient tool to assess fluorine pollution impact. Berries contamination seems to be affected directly by the factory smoke, there is no endogenous supply. Likewise, by its characteristic necrosis in the leaf boundaries, grapevine may be considered as a bioindicator variety of fluorine pollution which can be used in mapping polluted areas.

Mots clés : vignes locales, pollution fluorée, nécroses, sensibilité, défense

Key words: local vines, fluorine pollution, necrosis, sensitivity, defence

*Corresponding author: ferjani_fba@yahoo.fr

J. Int. Sci. Vigne Vin, 2004, **38**, n°4, 201-208

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

INTRODUCTION

La SIAPE ou Société Industrielle d'Acide Phosphorique et d'Engrais représente à l'heure actuelle la principale source de pollution atmosphérique dans la ville de Sfax (Tunisie). Depuis l'installation de cette usine, les agro-systèmes à son voisinage ne cessent d'être contaminés par des polluants atmosphériques du type HF, H2SiF6, CaF2 émis sous forme de gaz et de particules (BEN ABDALLAH et BOUKHRIS, 1990). A ces composés fluorés s'ajoutent le SO2 et les particules (AZRI et al. 2002). La compagnie Japonaise JICA (1993) a mis en évidence une pollution soufrée et fluorée dans les fumées dégagées par cette usine. De même, les analyses de l'air environnant l'usine, ont montré des teneurs en F-variant de 0,2 à 0,6 µgF/m^3 (MEZGHANI, 2001).

Plusieurs travaux ont rapporté l'action phytotoxique du fluor et son accumulation dans la zone marginale ou apicale des feuilles où les nécroses apparaissent (CHARLOT et KISMAN (1983), ELIFTHERIOU et al. (1991), MILLER (1993)). D'autre part, la sensibilité des plantes au fluor est extrêmement variable (BEN ABDALLAH et al. (1994). C'est pour tenter d'expliquer la différence de sensibilité au sein des différentes variétés de vignes locales que nous avons analysé les zones nécrosées. Ces analyses nous ont permis de les classer selon leur sensibilité.

L'objectif de ce travail consiste à étudier l'effet d'une pollution fluorée sur la vigne par la description des dégâts observés sur les feuilles et les fruits de quelques vignes autochtones. Il s'agit des variétés Asli, Jerbi, et Tounsi situées au voisinage de la source de pollution. L'analyse des vignes polluées est comparée à celle des mêmes vignes situées dans les écosystèmes non pollués. Par ailleurs, l'analyse des zones nécrosées nous a permis de classer les différentes variétés de vigne selon leur sensibilité aux polluants. Les effets de la pollution atmosphérique, aussi bien sur la conductance stomatique que sur les feuilles et les fruits de la vigne, ont été suivis en fonction du temps et de l'espace afin de mieux comprendre les diverses stratégies de défense adoptées par cette plante contre l'agression des polluants et d'édifier leur voies d'entrée et de sortie.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

I- MATÉRIEL VÉGÉTAL ET TECHNIQUES DE PRÉLÈVEMENT

La région d'étude est une plaine basse qui se raccorde à la mer Méditerranée, bordée par une série de collines culminant à 100 m d'altitude et située à 20 Km environ de la côte. Elle est soumise à des vents continentaux secs et à des vents maritimes très humides. La direction des vents dominants provient du secteur Sud-Est (25,5%), celle du vent Sud-Ouest apparaît avec une fréquence de l'ordre de 16,25%. Les directions du vent Nord-Ouest et Nord-Est ont des fréquences intermédiaires (ELLOUMI *et al*., 2003).

Les variétés étudiées ont été repérées sur des parcelles au voisinage de la SIAPE, usine de production d'engrais phosphatés située dans les environs sud de la ville Sfax (Tunisie). Il s'agit de 3 variétés locales (*Vitis vinifera* L.) Asli, Jerbi et Tounsi. Les prélèvements des échantillons (feuilles et fruits) de chacune de ces vignes ont été effectués sur le côté exposé aux fumées de l'usine. Des échantillons témoins ont été récoltés sur les mêmes vignes cultivées dans une parcelle non polluée située à 30 Km de l'usine.

Afin de suivre l'enrichissement progressif des vignes polluées en fluor, trois prélèvements mensuels de 90 feuilles ont été faits sur les mêmes vignes, au milieu des rameaux pour les stades précoces et à partir du douzième nœud des sarments pour les stades plus développés. Les échantillons prélevés ont été immédiatement stockés dans des sachets en polyéthylène. Une partie d'entre eux ont ensuite été lavés à l'eau distillée afin d'éliminer les poussières et les particules déposées.

Les fruits ont été récoltés pendant deux périodes différentes, la première juste au stade avant véraison et la seconde avant la période des vendanges, lorsque les fruits commencent à se flétrir. A chaque échantillonnage, trois lots de 70 baies chacun ont été prélevés à des pieds différents. Au laboratoire, les pépins ont été séparés du péricarpe avant séchage. Les échantillons lavés et non lavés ont été séparés, séchés à l'étuve à 80°C pendant 48 heures pour les feuilles, et 8 jours pour les péricarpes et les pépins. Ils ont ensuite été finement broyés et réduits en poudre homogène.

Afin de suivre l'évolution de la teneur en F- en fonction de l'éloignement de la source, nous avons analysé à partir de la source d'émission, des feuilles de la variété Asli, dont les pieds se développent dans des parcelles de vigne cultivées situées approximativement tous les 500 à 1 000 m. Pour chaque pied, les échantillons ont été prélevés le même jour dans les différents endroits éloignés de la source, suivant une même direction.

II- MÉTHODES DE MESURE ET D'ANALYSE

La conductance stomatique foliaire a été mesurée chaque mois après le débourrement des bourgeons et le début du développement des feuilles. Les mesures ont été effectuées entre 8h30 et 10 heures du matin, pendant les jours ensoleillés, à l'aide d'un poromètre à diffusion, type «MK III, DELTA-T DEVICES». Elles ont porté sur des échantillons de 9 feuilles sélectionnées au milieu des sarments de 3 pieds par variété .

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

Le fluor a été extrait sur le minéralisât des poudres végétales des feuilles, obtenu par calcination au four électrique à 450°C suivie d'une fusion alcaline à chaud en présence de soude en pastilles. Le dosage a été effectué par une électrode spécifique aux ions fluorures (inoLab/ Model WTW) couplée à un Ionomètre pHmètre (pH/ION R503) selon la procédure décrite par ADRIANO et DONER (1982).

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel SAS (Statistical Analysis System, Version 6.12) suivant la procédure Anova (Analysis of variance) avec l'utilisation du test de Duncan (multiple range test) et celui de Waller-Duncan-K-ratio-t-Test.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Le suivi spatio-temporel des effets de la pollution fluorée sur la vigne a révélé la présence de symptômes caractéristiques et typiques d'une pollution par les composés fluorés sur les feuilles des plantes croissant au voisinage de l'usine polluante, comme dans les travaux précédents (MEZGHANI, 2001), Il s'agit de nécroses marginales. Les résultats de BEN ABDALLAH *et al.* (1994) ont montré que ces nécroses sont associées à une accumulation préférentielle du fluor dans les zones périphériques aussi bien nécrosées que celles non nécrosées.

I- ÉVOLUTION TEMPORELLE DE LA TENEUR EN FLUOR

Les résultats de la teneur en fluor dans les feuilles des vignes polluées montrent à première vue des valeurs moyennes assez élevées pour les trois variétés étudiées, de l'ordre de 10^6 mgF/g MS pour Asli, 80 mgF/g MS pour Jerbi et 63 mgF/g MS pour Tounsi. Les teneurs maximales sont atteintes dans les feuilles prélevées au mois d'août, qui correspond à une période chaude et sèche de l'année. Toutefois, des baisses légères sont observées lors des prélèvements effectués après des chutes de pluies, comme c'est le cas des prélèvements du mois de juin opérés après une pluie fine prolongée, de 45 mm (figure 1). Cet effet pourrait être du à un lessivage des plantes et à une dépollution de l'atmosphère par les eaux de pluie, mais aussi à une décontamination de la rhizosphère par les eaux d'infiltration qui pourraient entraîner les polluants vers la nappe. L'examen de la figure 1, qui illustre l'évolution au cours de la période de suivi (de mars à octobre), de la teneur en F- des feuilles de vignes polluées, montre une courbe à 3 phases :

Une première phase, au cours de laquelle on note un enrichissement progressif en fluor des tissus foliaires de la vigne. Cette phase d'enrichissement se prolonge jusqu'au 15 août, où la teneur en F^- atteint une valeur maximale suivie d'une deuxième phase caractérisée par une diminution peu marquée de la teneur en fluor. Elle s'étend jusqu'à la deuxième moitié du mois de septembre (figure 1). La dernière phase s'étend jusqu'à la deuxième moitié du mois d'octobre où les teneurs en fluor diminuent peu à peu et semblent tendre vers un pallier.

Selon BEN ABDALLAH (1999), la période allant du 15 mai au 15 juillet correspond bien à la saison active de la vigne, et le végétal en pleine croissance végétative peut supporter l'agression des polluants. D'ailleurs, les valeurs assez élevées de la conductance stomatique enregistrées au cours des mois de juin et juillet (figure 3) laissent penser que la vigne peut tolérer, au cours de la saison active, l'entrée du fluor à travers les stomates et par conséquent l'augmentation de la dose effective des polluants.

Selon GARREC et PLEBIN (1986), le fluor de l'air, principalement sous forme gazeuse (HF), est absorbé par les feuilles au niveau des stomates. Une autre partie de ce fluor peut, cependant, pénétrer à travers la cuticule. En considérant les réponses initiales d'ouverture des stomates aux polluants, les résultats enregistrés au cours de cette période ne semblent pas affirmer la tolérance de la vigne aux polluants de l'atmosphère. Dans nos conditions, les premiers dégâts foliaires n'apparaissent qu'à partir de la fin du mois de mai sous forme de nécroses et de brûlures. Il semble qu'en raison de sa grande surface foliaire, d'une part, et grâce à ce mécanisme de concentration externe en fluor d'autre part, les dégâts sont limités aux extrémités des feuilles. La vigne peut donc tolérer une certaine quantité du polluant tout en maintenant une activité photosynthétique normale. Bien que BONTE (1986) ait attribué le retard considérable, entre le temps d'exposition des feuilles aux fumées de l'usine et l'ap-

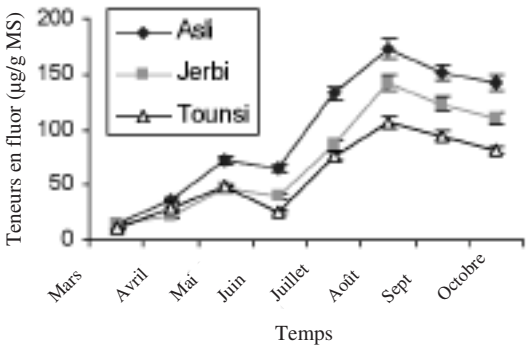


Fig. 1- Évolution de la teneur en F^- des feuilles lavées de variétés de vignes locales en fonction du temps.
Les moyennes indiquées (a, b, c) montrent une différence significative à $p \leq 0,01$ en utilisant le test de Duncan.

Evolution of washed local grapevine leaves F^- content in function of time.
Means indicated (a, b, c) show significant difference at $p \leq 0,01$ using Duncan Test.

J. Int. Sci. Vigne Vin, 2004, **38**, n°4, 201-208
©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)



Fig, 2 - Nécroses caractéristiques du fluor sur une feuille de Asli

Fluorine characteristic necrosis on Asli leaf

parition de nécroses, à l'influence des vents dominants, nous pensons, toutefois, que la toxicité des polluants ne s'exerce qu'au-delà d'une certaine concentration.

Travaillant dans des vignobles situés à des distances, plus éloignées que les nôtres, de la source de pollution, LEECE *et al.* (1986) ont constaté, chez les feuilles de vigne ayant accumulé de 26 à 36 mgF/g MS, des nécroses marginales réduisant jusqu'à 10 % de la surface assimilatrice. Il ressort que les teneurs en F^- atteintes à la fin de cette première phase, sont relativement toxiques. D'ailleurs, à partir de la fin du mois de juillet, les nécroses ont commencé à envahir la surface des feuilles. Chaque fois que l'étendue des plages nécrosées augmente, un nouveau liseré de transition, moins atténué que le premier, se forme et ainsi de suite jusqu'à obtenir des auréoles de zones nécrosées séparées par des liserés distingués par leur couleur violet à brun foncée (tableau I, figure 2).

Les nécroses marginales représentent donc les symptômes liés à la présence des fluorures aussi bien dans l'air environnant que dans le végétal. Ce qui traduit la sensibilité de la vigne à la pollution fluorée. Au sens de FESTY (2002), de telles plantes sont bio-indicatrices de pollution, car elles peuvent fournir des informations intéressantes sur la qualité atmosphérique, métrologique et écologique. De ce fait, la vigne peut être utilisée dans la cartographie de la pollution fluorée d'une région donnée.

La réduction de la concentration en fluor, pendant la deuxième phase (figure 1), peut être attribuée à une stratégie adoptée par la plante afin de diminuer l'intensité des dégâts et d'assurer le minimum d'activités physiologiques. Dans nos conditions, à l'exception de la variété Tounsi dont l'ouverture des stomates semble stimulée, de juillet à septembre (figure 3), les variétés Asli et Jerbi ont manifesté une augmentation progressive de leur résistance stomatique au fur et à mesure que l'agression du polluant augmente, limitant ainsi l'entrée du fluor dans leur tissus végétaux. Sachant que que ces vignes, aussi bien polluées que témoins, sont cultivées dans des conditions pédo-climatiques pareilles, peut-on supposer que la fermeture temporaire des stomates constitue pour ces deux variétés un moyen de défense contre les effets du polluant?. Dans ces conditions et si l'on considère certaines caractéristiques de la région d'étude (températures élevées comprises entre 35 et 40 °C, rareté voire absence des pluies), on peut supposer que ces facteurs contribuent efficacement à apporter à ces vignes une stratégie de défense naturelle.

Selon LEECE *et al.* (1986), le vieillissement des feuilles et les températures de l'été imposent à la plante des mouvements stomatiques passifs en réponse au stress induit par le déficit hydrique.

Dans des conditions équivalentes à celles de nos vignes, MURRAY et WILSON (1988) ont constaté, suite à une action simultanée de HF et SO_2, des teneurs en F^- des feuilles d'Eucalyptus plus réduites que celles des mêmes feuilles exposées seulement à l'action de HF. Tout se passe comme si le SO_2, lorsqu'il est associé à HF, augmente la résistance à la diffusion des stomates aboutissant à une diminution de l'entrée de HF.

Aux mois de septembre et octobre, lorsque les surfaces foliaires ne sont représentées que par une faible proportion, de larges plaques nécrosées se détachent et tombent.

Les teneurs anormalement élevées en fluor des feuilles non lavées des 3 variétés Asli, Jerbi et Tounsi qui peuvent atteindre, au cours de cette période, respectivement 415, 372 et 221 mgF/g MS, semblent, cependant, apporter un témoignage d'une pollution particulaire déjà signalée par AZRI *et al.* (2002) et d'une autre fluorée, puisque les teneurs en F- chez les témoins varient de 10 à 20 mgF/g MS. Les particules analysées semblent, selon ces auteurs, riches en fluor et en calcium. Cette différence importante entre les teneurs en F- des feuilles lavées et non lavées suggère la possibilité d'une exclusion du fluor à l'extérieur de la feuille et son élimination par lessivage. Les substances particulaires ou gazeuses déposées à la surface des feuilles peuvent aussi boucher les stomates et contribuer ainsi à la limitation des capacités assimilatrices de ces organes. En outre, il est à noter que cette période (septembre-octobre) , correspond en Tunisie, à la période de dormance de la vigne (EZZILI, 1991), où l'activité photosynthétique et les fonctions métaboliques sont réduites au maximum. D'ailleurs, les valeurs de la conductance stomatique enregistrées au cours de cette période (figure 3) suggèrent une indifférence de la plante vis-à-vis des facteurs écologiques et une perte de la capacité de

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

turgescence des cellules de garde ce qui confirme l'entrée de la plante en dormance.

Par ailleurs, l'examen de la courbe de la Figure 1 révèle qu'au départ de la saison active, juste après le débourrement des bourgeons, les teneurs en F^- des jeunes feuilles nouvellement formées sont proches de celles des témoins (de l'ordre de 15 à 18 mgF/g MS). Par voie de conséquence, ces vignes ne semblent pas accumuler du fluor à partir des bourgeons et des tiges (si l'on suppose qu'il a été transporté vers ces organes). Ceci suggère que le fluor prélevé par la feuille n'est donc pas exporté hors de ces organes à la sénescence, il reste donc stoqué à ce niveau. Ces résultats nous amènent à déduire que les feuilles de vigne arrivées à maturité peuvent représenter une base objective de l'évaluation de l'impact d'une pollution fluorée.

II- SENSIBILITÉ DES VIGNES AUX POLLUANTS

Pour les trois variétés étudiées, la région nécrosée est séparée de la région saine par un liseré de transition de couleur violet foncée (figure 2). Selon EZZILI *et al.* (1999), il s'agit de pigments anthocyaniques sécrétés par la plante chaque fois qu'elle est soumise à un stress. La sécrétion de ces anthocyanes suivant une ligne contournant les tissus nécrosés peut constituer une réaction primaire de défense développée par la plante afin de limiter les dégâts de ce polluant aux extrémités des feuilles.

Nos résultats confirmés par les analyses statistiques (figure 1) montrent, chez les trois vignes locales étudiées, des niveaux d'accumulation foliaires en F^- significativement différents. Les variétés Asli et Jerbi qui montrent les teneurs en F- les plus élevées par comparaison avec celles de Tounsi (figure 1), manifestent parallèlement des étendues de plages et d'auréoles nécrosées de moindre importance (tableau I). Il apparaît ainsi que les variété Asli et Jerbi manifestent une sensibilité à la pollution fluorée moins importante que celle de Tounsi, bien qu'elles accumulent plus de fluor. Nous pouvons classer ces trois variétés suivant un ordre de sensibilité décroissant : Tounsi > Jerbi > Asli.

L'ensemble de ces résultats suggère que les variétés tolérantes, qui accumulent plus de fluor dans leurs feuilles,

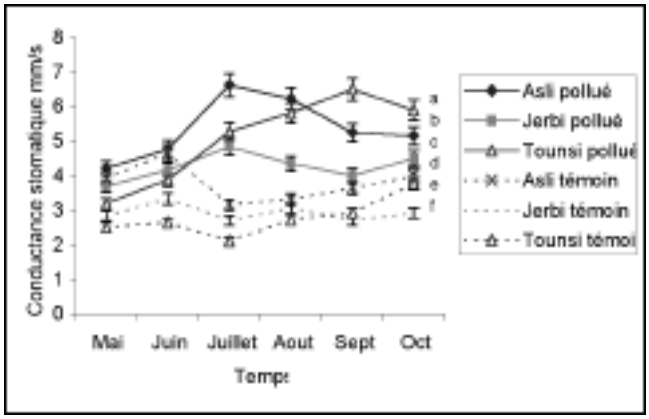


Fig. 3 - Évolution temporelle de la conductance stomatique foliaire.

Les moyennes indiquées (a, b, c) montrent une différence significative à $p \leq 0,01$ en utilisant le test de Duncan

Temporal evolution of stomatal conductance.

Means indicated (a, b, c) show significant difference at $p \leq 0,01$ using Duncan Test

sont capables de le compartimenter dans leurs vacuoles et/ou de le complexer afin d'épargner les activités métaboliques de leurs effets nocifs. D'ailleurs, chez ces deux variétés, le liseré de transition séparant les tissus sains de ceux nécrosés était si prononcé qu'il y ait détachement des zones nécrosées, permettant ainsi à la plante de maintenir ses fonctions photosynthétiques à un niveau compatible avec sa survie dans ces conditions contraignantes. D'ailleurs, BEN ABDALLAH *et al.* (1994), après avoir analysé séparément des tissus sains et nécrosés de feuilles de vignes et de figuier, croissant aux environs de la même usine, ont montré des concentrations élevées en fluor dans les tissus nécrosés. Les concentrations en fluor dans les tissus sains se rapprochent cependant de celles des mêmes plantes situées dans la zone témoin. BEN SALEM *et al.* (1997) ont déjà signalé l'aptitude de ces deux variétés à s'adapter aux sols sableux et aux conditions des zones arides. En effet, dans le cadre de la réhabilitation des vignes autochtones dans le Sahara, ces auteurs ont réussi à planter ces vignes dans la région de Rgim Maatoug située à l'extrême sud tunisien. À la lumière de ces résultats, on peut supposer que la résistance à la sécheresse

Tableau I - Comparaison des zones nécrosées des différentes variétés de vignes locales (30 feuilles par variété).

Les moyennes indiquées (a, b, c) montrent une différence significative à $p \leq 0,01$ en utilisant le test de Duncan

Comparaison of different local vines varieties necrotic areas (30 leaves per variety).

Means indicated (a, b, c) show significant difference at $p \leq 0,01$ using Duncan Test

Variétés	% de surface nécrosée	Nombre d'auréoles nécrosées
Asli	15,3c	1,6c
Jerbi	25,6b	2,2bc
Tounsi	55,7a	4,3a

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

pourrait induire une diminution de la sensibilité à la pollution.

III- EFFETS SUR LE FRUIT

Durant la période d'observation, nous avons constaté que les effets de la pollution se manifestent sur les baies avant leur maturité. Les effets se présentent sous forme de taches noires de taille variable, et se développent généralement sur les grappes les plus exposées aux fumées de l'usine. Nos résultats montrent que c'est principalement le péricarpe qui accumule du fluor (figures 4 et 5). Au cours du temps, les baies se flétrissent, se dessèchent et ne tardent pas à chuter. Ces mêmes effets ont été rapportés par ZHANG et HUANG (1998) sur le mangue (*Mangifera indicia* L.), Ces auteurs les ont attribués aux composés fluorés émis par les briquetteries et les usines de production d'aluminium. De même, une réduction du nombre de graines par fruit a été observée chez les tomates et le haricot (BONTE, 1986). Cet auteur a signalé que la floraison est le stade le plus sensible à la pollution au fluor.

En outre, nous avons remarqué que les attaques sur le fruit se sont manifestées sur les fruits au moment où les nécroses foliaires sont accentuées… L'absence de nécroses apparentes sur les baies de raisin protégées par un couvert feuillu est en faveur de l'hypothèse selon laquelle la contamination du fruit se fait directement par les fumées de l'usine et non par translocation du fluor accumulé dans les feuilles.

MURRAY (1984) a rapporté une accumulation très élevée en fluor au niveau des pédoncules et non au niveau des baies. Tout se passe comme si cet organe agit en bloquant la translocation du fluor des sites de son absorption vers le fruit. FEDORKOV (1999) a montré que les feuilles et les fruits exposés directement aux vents de l'usine sont toujours soumises à une pollution intense. Les différences significatives enregistrées entre les teneurs en F- des baies au stade avant véraison (T1) et enfin de la saison (T2) ne sont pas également en faveur d'un apport endogène (figure 4). En effet, les grappes étant abritées par un feuillage important au début de la belle saison, montrent à ce stade des teneurs en F^- peu élevées. Cependant, avec le temps et chaque fois que les vents du Sud-Est dominent, l'agression du polluant s'accentue et entraîne une chute des feuilles. Il s'ensuit une exposition directe des fruits aux masses d'air polluantes (on veut bien vous croire).

IV- ÉVOLUTION SPATIALE DE LA TENEUR EN F^-

L'examen de la figure 6 montre un abaissement des teneurs en F^- au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source pour la variété Asli. Les teneurs en F^- sont particulièrement élevées dans les zones entourant la source émettrice de gaz fluorés. Jusqu'à une distance de 3 km de la source, les feuilles de vigne sont recouvertes de poussières blanchâtres formant une pellicule parfois difficile à enlever, cette pellicule va contribuer à boucher les stomates et couvrir les surfaces assimilatrices. Ainsi, les valeurs relativement faibles de la conductance stomatique de ces vignes enregistrées au cours de cette période (figure 7) semblent indiquer une pollution aussi bien fluorée que particulaire.

Selon ELLOUMI *et al.* (2003), la fréquence des vents forts, dont la vitesse est supérieure à 9 m/s, ne dépasse

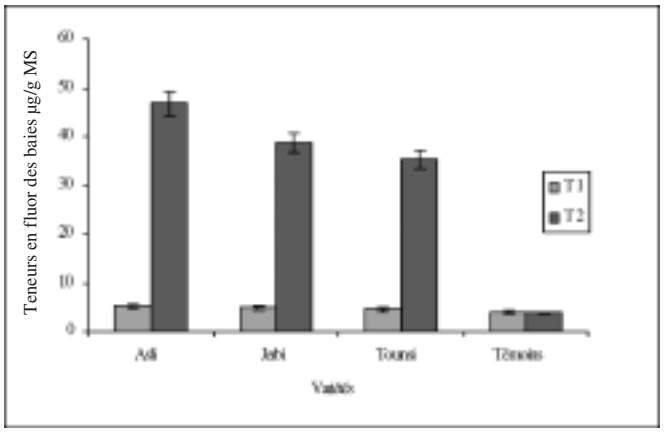


Fig. 4 -Teneurs en fluor du péricarpe des baies à deux périodes différentes (T1 fin mai, T2 fin juillet).
Les variations des teneurs en F^- des baies en fonction du temps sont significatives à ($p \leq 0, 001$)

Berries pericarp F^- contents at two different periods (T1 end of may, T2 end of july).
Variations of berries F^- content are significant at ($p \leq 0, 001$).

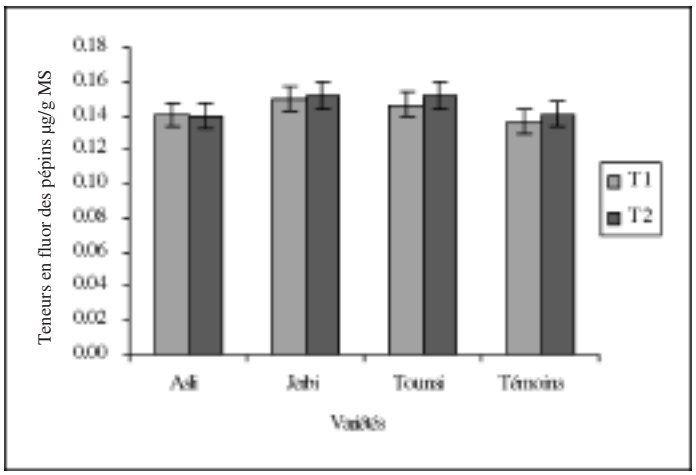


Fig. 5 -Teneurs en fluor des pépins à deux périodes différentes (T1 fin mai, T2 fin juillet).
Les variations des teneurs en F^- des pépins en fonction du temps ne sont pas significatives.

Seeds F^- contents at two different periods (T1 end of may, T2 end of july).
Variations of seeds F^- content are not significant.

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

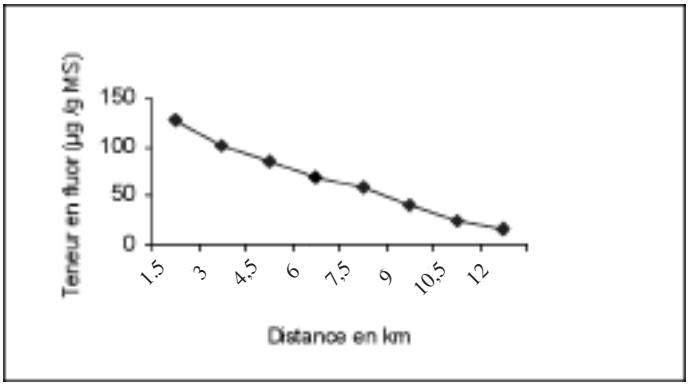


Fig. 6 - Teneurs en F^- des feuilles de Asli en fonction de la distance.

Asli leaf fluoride content in function of distance.

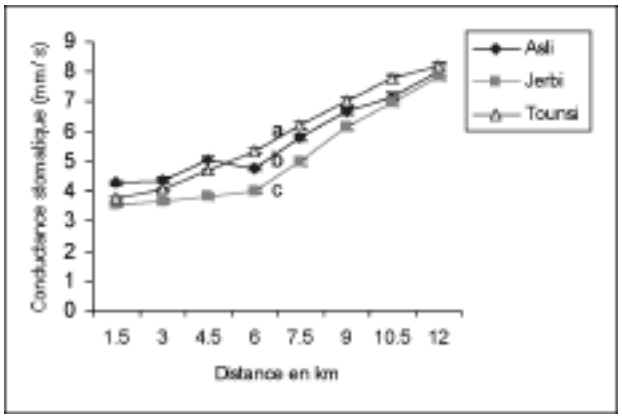


Fig. 7 - Conductance stomatique foliaire des vignes locales en fonction de la distance.

Les moyennes indiquées (a, b, c) montrent une différence significative à $p \leq 0,01$ en utilisant le test de Duncan

Grapevine leaf stomatal conductance in function of distance.

Means indicated (a, b, c) show significant difference at $p \leq 0,01$ using Duncan Test

guère 4 % dans la région d'étude. Ces vents faibles semblent ainsi favoriser un dépôt de poussière important sur les feuilles des vignes situées à proximité de l'usine. Au-delà de cette distance, le dépôt de poussières diminue peu à peu pour disparaître complètement autour d'un rayon supérieur ou égal à 5 km. Il en est de même pour les valeurs de la conductance stomatique qui tendent également à augmenter considérablement (figure 7). Ainsi, il ressort que les vents forts favorisent la dispersion des émissions et entraînent un faible dépôt de poussières sur les feuilles de vigne éloignées de l'usine.

À une distance de 5 km de l'usine, quelques pieds de vignes, apparemment situés en dehors de la zone directement soumise à l'action des fumées, ne présentent de nécroses que vers le 15 juin. À 8 km de l'usine, des nécroses de faible intensité ont été notées sur la variété Tounsi, qui manifeste une grande sensibilité aux composés fluorés. L'étendue de la zone polluée semble, toutefois, dépendre de certains facteurs comme la hauteur de la cheminée, la taille des particules, l'humidité relative, la vitesse et le régime des vents dominants et la topographie du site étudié. A 10 km, en dehors de la présence de toute usine, aucun symptôme d'intoxication n'a été observé et les teneurs en fluor ne dépassent pas les 40 µgF/g MS. À 12 km de la source, les teneurs en F^- se rapprochent considérablement de celles des témoins (figure 6).

CONCLUSION

La vigne semble tolérer, au cours de la saison active, l'entrée du fluor. Grâce à un mécanisme de concentration externe, la plante tend à accumuler préférentiellement cet élément, étranger à son métabolisme, dans les bordures des feuilles où apparaissent des nécroses marginales de couleur rouge brique caractéristiques des composés fluorés. La vigne peut être ainsi considérée comme une plante bio-indicatrice de pollution fluorée et, par voie de conséquence, utilisée dans la cartographie de la pollution d'une région donnée.

Afin de limiter les dégâts aux extrémités et aux bordures des feuilles, la vigne réagit par la formation d'un liseré de transition séparant les tissus sains de ceux nécrosés. Ce qui permet à la plante de garder une proportion importante de surface assimilatrice. Avec le temps, les nécroses ne cessent d'envahir la surface foliaire, les zones nouvellement nécrosées sont délimitées par un nouveau liseré de transition, moins atténué que le précédent, et ainsi de suite jusqu'à obtenir des auréoles nécrosées. Le nombre d'auréoles nécrosées semble constituer un moyen efficace pour évaluer le degré de sensibilité de la vigne à la pollution. Selon ce critère, les variétés Asli et Jerbi semblent moins sensibles à cette pollution que la variété Tounsi.

Au-delà d'une concentration toxique atteinte vers le 15 août pour les trois variétés étudiées, la réduction de l'intensité des dégâts peut être expliquée par plusieurs stratégies adoptées par la vigne, parmi lesquelles, la production de pigments anthocyaniques délimitant les zones nécrosées, la fermeture temporaire des stomates, les possibilités de compartimentation vacuolaire du fluor et même de son exclusion à l'extérieur de la feuille suivie de son élimination par lessivage, la détoxication par le calcium et le magnésium. Nos résultats semblent également confirmer que l'association de HF avec le SO_2 semble en faveur d'une diminution de l'entrée du fluor. Je pense que tous ces éléments ne sont pas vraiment démontrés par l'étude et doivent rester à l'état d'explication possible.

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

Nos résultats confirment également que le fluor prélevé par la feuille reste stocké au niveau de ces organes. Les feuilles de vigne arrivées à maturité représentent donc un moyen efficace pour l'évaluation de l'impact de la pollution fluorée sur les plantes. La contamination des baies semble se faire directement par les fumées de l'usine, plutôt que par apport endogène.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADRIANO D.C. et DONER H.E., 1982. Bromine, Chlorine and Fluorine. In Methods of Soil Analysis. Part 2- Chemical and microbiological Properties. Eds. A L page, R H Miller and D R Keeney. pp 449-483. *American Society of Agronomy*. Madison, WI.

AZRI C., TILI A. SERBAJI M. et METHIOUB K., 2002. Etude des résidus de combustion des fuels liquide et solide et de traitement chimique du phosphate brut dans la ville de Sfax (Tunisie). *Pollution atmosphérique,* **174**, 297-307.

BEN ABDALLAH F., 1999. Les vignes autochtones: caractérisation, régénération et dépistage *in vitro*, *Thèse de Doctorat de Biologie*. Faculté des Sciences de Tunis. 200pp.

BEN ABDALLAH F. et BOUKHRIS M., 1990. Action des polluants atmosphériques sur la végétation de la région de Sfax (Tunisie). *Pollution Atmosphérique,* **127**, 292-297.

BEN ABDALLAH F., HENCHI B. BOUKHRIS M., 1994. Réponses des végétaux d'une région aride à une pollution atmosphérique double (SO_2 + composés fluorés). *Pollution Atmosphérique*, 117-122.

BEN SALEM A., BEN ABDALLAH F. KCHOUK M.L. ASKRI F. et GHORBEL A., 1997. Rehabilitation and Development of native grapevine varieties in forest and Arid areas of Tunisia. *Acta Horticulturae*, **441**, 251-256.

BONTE J., 1986. Les composés fluorés atmosphériques et la fructification des arbres fruitiers, Défense des cultures. *Phytoma*, 14-17.

CHARLOT C. et KISMAN S., 1983. Effets de la pollution fluorée sur la répartition des éléments minéraux dans les feuilles et les racines tubérifiées de *Radis Raphanus Sativus* L. *Environmental Pollution.*, **31**. 311-319.

ELLOUMI N., BEN ABDALLAH F. MEZGHANI I. et BOUKHRIS M., 2003. Accumulation du plomb par quelques espèces végétales cultivées au voisinage d'une fonderie de plomb à Sfax. *Pollution Atmosphérique*, **178**, 285-295.

EZZILI B., 1991. Recherches sur la fertilité de la vigne. *Thèse de spécialité*. Faculté des Sciences de Tunis. 229 pp.

EZZILI B., DARNE G. et BEJAOUI M., 1999. Mise au point d'une technique de production d'anthocyannes dans les feuilles de boutures à un œil de CARIGNON (*Vitis vinifera* L) au laboratoire. *J. Int Vigne Vin*, **33**, 1, 34-38.

FEDORKOV A., 1999. Influence of air pollution on seed quality of *Picea obovata*. *Eur. Journal. For, Path*. **29**, 371-375.

FESTY B., 2002. Les phénomènes de pollution atmosphérique: nécessité et difficultés d'une vision environnementale et sanitaire globale. *Annales des Mines, Responsabilité et Environnement*, **27**, 35-53.

J.I.C.A. (1993). Exhaust gas of selected industries in the region of Sfax. Report submitted by Japan International Cooperation *Agency to Regional Laboratory of Environment*, ENIS-Sfax 31 p.

LEECE DR., SCHELTEMA J.H. et ANTONEN T., 1986. Fluoride Accumulation and Toxicity in Grapevines Vitis vinifera L. in New South Wales. *Environmental Pollution*, **40**, 145-172.

MACHOY-MOKRZYNSKA., 1995. Fluoride-Magnesium Interaction. *Fluoride*, **28**, 4, 175-177.

MURRAY F., 1984. Effects of Long-term Exposure to Hydrogen Fluoride on Grapevines. *Environmental Pollution*, **36**, 337-349.

MURRAY F. WILSON S., 1988. Effects of sulphur Dioxide, Hydrogen Fluoride and their combination on three Eucalyptus species. *Environmental Pollution*, **52**, 265-279.

ZHANG CL. et HUANG HB., 1998. The stunted fruit disorder-A physiological anomaly in mango (*Mangifera indicia* L.) caused by a fluorine pollutant. *J. Hortic. Sci. Biotech*., **73** (4). 513-516.

Manuscrit reçu le 12 mai 2004 ; accepté pour publication, après modifications le 31 août 2004

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)