



Utilisation volontaire d'agents phytopathogènes contre des cultures

L'agro-terrorisme et ses conséquences sur notre approche de la lutte contre les maladies des plantes

Frédéric Suffert*

Les maladies des plantes peuvent être des armes biologiques, c'est-à-dire des « associations de tout agent infectieux avec un vecteur, quel qu'il soit (obus d'artillerie, bombes, missiles, aérosols...), dans le but de nuire à d'autres personnes » (Mates, 1999). Les agents biologiques utilisés pour fabriquer de telles armes sont soit des organismes vivants, soit des toxines (substances ou produits non vivants issus de plantes ou de micro-organismes tels que le ricin ou la toxine botulique).

Dans la première catégorie se trouvent les bactéries, à l'origine de la peste ou du charbon de l'homme et des animaux par exemple, et les virus pouvant causer des maladies type variole ou fièvre jaune. Sont aussi concernés les agents phytopathogènes qui s'attaquent à des productions végétales agricoles. Ils sont l'objet de cet article.

La Convention sur les armes biologiques et à toxines de 1972 (CABT), premier traité international de désarmement sur ce thème, ne définit pas clairement le terme « *agent biologique* », précisé dans des rapports de l'ONU (1969) et de l'OMS (1970). Il s'agit d'agents « dont les effets dépendent de leur aptitude à se multiplier dans l'organisme attaqué, à provoquer la mort ou la maladie chez l'homme, les animaux et les plantes ».

La Convention de 1972 couvre les toxines en tant que poisons d'origine naturelle, mais semble ignorer les agents nocifs pour l'environnement retenus par l'OMS : causes d'atteintes au bétail et aux récoltes, dont la destruction porte un préjudice grave à la subsistance des populations humaines. En l'occurrence, les agents phytopathogènes peuvent s'avérer une arme économique ou humanitaire redoutable. Rappelons les effets désastreux d'attaques naturelles de cultures de pomme de terre par le mildiou (*Phytophthora infestans*) en Irlande en 1845-1846, ou l'épidémie d'helminthosporiose du riz (*Bipolaris ory-*

zae) au Bengale en 1942, quand des pertes de 50 à 90 % des récoltes ont entraîné la mort de près de 2 millions de personnes.

Une analyse plus fine du problème posé par les armes anti-culture et le bioterrorisme agricole, notamment sous l'angle historique, permet de prendre conscience de la réalité et de l'importance de la question.

Agents phytopathogènes et maladies impliqués en tant qu'« arme biologique »

L'idée selon laquelle les armes biologiques pourraient être utilisées contre les cultures ou les produits agricoles n'est ni nouvelle, ni saugrenue (Rogers *et al.*, 1999 ; Margolian, 2000 ; Suffert, 2002 ; Wheelis *et al.*, 2002).

Inventaire

Dès les années 20, la France, la Grande-Bretagne, l'Allemagne et le Japon ont entrepris des recherches sur des armes incluant un volet agricole, recherches poursuivies durant la Seconde Guerre mondiale. Des insectes nuisibles, des substances herbicides et nombreuses maladies des cultures firent l'objet d'études. Durant cette

période, des travaux allemands ont visé l'Angleterre et les États-Unis, ainsi que l'Argentine et la Roumanie dont les stocks de récoltes étaient susceptibles de participer à l'effort de guerre allié. Ces travaux portaient sur le mildiou de la pomme de terre (*P. infestans*), la pyriculariose du riz (*Magnaporthe grisea*), les rouilles jaune et noire du blé (*Puccinia striiformis* et *P. graminis*).

Le Japon s'est quant à lui intéressé aux effets de champignons, bactéries et nématodes sur de nombreuses plantes cultivées en Mandchourie et Sibérie. Il commençait à faire des réserves de spores de rouille des céréales et projetait d'attaquer les champs de blé américains et soviétiques.

À la fin des années 30, peut-être en prévision de la Seconde Guerre mondiale, les États-Unis entamèrent des recherches sur des armes biologiques anti-culture. Plusieurs agents phytopathogènes firent l'objet d'essais sur le terrain et quelques-uns furent même stockés. Le programme américain avait pour principale cible le blé d'Ukraine et le riz chinois. Il visait aussi la pomme de terre avec le mildiou, et le soja, la betterave à sucre, les patates douces et le coton avec des champignons du genre *Sclerotinia* touchant le système racinaire des plantes.

Il est avéré qu'entre 1951 et 1969 les États-Unis

* INRA-UMR BiO3P - Épidémiologie et nuisibilité des maladies appliquées à la protection intégrée - Domaine de la Motte BP 35327 - 35653 Le Rheu cedex. *suffert@rennes.inra.fr

ont accumulé plus de 30 tonnes de spores de *Puccinia tritici f. sp. graminis*, champignon responsable de la rouille noire du blé, et en 1966 plus d'une tonne de spores de *Pyricularia oryzae* (anamorphe de *Magnaporthe grisea*), agent responsable de la pyriculariose du riz. Cette maladie, une des plus préjudiciables aux cultures de riz, entraîne des pertes de récolte très importantes. Les plants infectés peuvent produire des milliers de spores facilement dispersées par le vent et à l'origine de progressions rapides d'épidémies. La difficulté de concevoir des plants de riz génétiquement résistants fait de cette maladie une arme qui reste potentiellement dangereuse.

Bombes, ballons, pigeons

Plusieurs méthodes d'introduction des agents phytopathogènes ont elles-mêmes fait l'objet de recherches. Citons les munitions en grappes, les bombes « volantes », les ballons sans équipage et les pigeons voyageurs... Ces armes ne furent jamais utilisées mais il semble que les États-Unis auraient envisagé d'attaquer les rizières japonaises durant les derniers mois de la Deuxième Guerre mondiale.

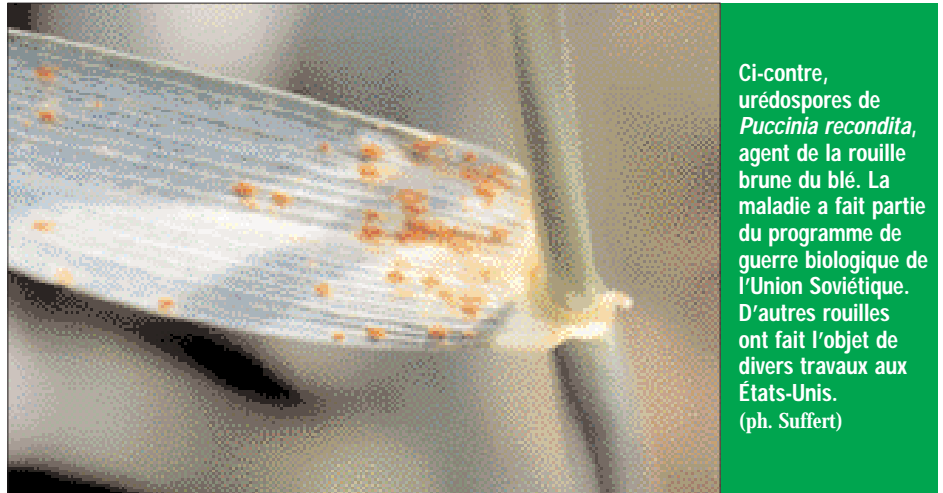
Les recherches ont continué au début de la guerre froide, motivées par l'idée qu'il fallait contrer les programmes soviétiques et chinois par une politique de dissuasion (Line *et al.*, 2001).

Grâce à la loi américaine sur la liberté de l'information, plusieurs documents confidentiels ont récemment été publiés (Rogers *et al.*, 1999). Leur contenu fait état du développement d'une bombe d'environ 200 kg remplie de plumes couvertes de spores de rouille des céréales. Les plumes libérées par la bombe étaient censées flotter jusqu'au sol, et, dispersées par le vent, se répartir sur un vaste territoire pour contaminer les cultures par contact. Les résultats de tests désormais accessibles indiquent que des plumes couvertes de spores à 10 % (en masse) et larguées par un adaptateur à environ 500 mètres d'altitude, transportent suffisamment de spores pour déclencher une épidémie.

En 1969, par la volonté du président Nixon, les États-Unis ont renoncé à leur programme de guerre biologique offensive et tous les stocks furent officiellement détruits par la suite. Pourtant, en 2002, un brevet déposé par l'armée américaine pour un lanceur portatif (« *Rifle-launched non-lethal cargo dispenser* », US patent 6.523.478) rappelle certains programmes de recherches menés pendant la guerre froide (The Sunshine Project, 2003).

Il est également reconnu que les rizières du Nord Viet-Nam furent les cibles potentielles d'agents anti-culture américains dans les années 60, ainsi que certaines cultures d'exportation au Nicaragua dans les années 70.

Selon la retranscription d'une récente réunion du Conseil d'État cubain, La Havane est convaincue que la CIA est à l'origine de plusieurs attaques contre Cuba par des armes bactériologiques entre 1961 et 1981. L'État cubain n'a jamais été en mesure de prouver ces allégations et tous les scientifiques du pays, sauf un, ont évité d'appuyer publiquement les plaintes du



Ci-contre, urédospores de *Puccinia recondita*, agent de la rouille brune du blé. La maladie a fait partie du programme de guerre biologique de l'Union Soviétique. D'autres rouilles ont fait l'objet de divers travaux aux États-Unis. (ph. Suffert)

gouvernement. En 1979, le Washington Post a pourtant écrit un article affirmant que la CIA avait effectivement un programme secret pour détruire l'agriculture cubaine et que depuis 1962 les États-Unis produisaient des agents bactériologiques utilisables contre la canne à sucre et le tabac, deux des principales ressources de l'économie cubaine. De telles informations restent à l'heure actuelle difficilement vérifiables.

Côté soviétique

Le programme de guerre biologique de l'ex-Union Soviétique commença quant à lui en 1928, sous la direction de l'Armée rouge. À son apogée, il aurait mobilisé plus de 60 000 militaires et civils travaillant dans environ 55 instituts et centres de production dont une partie se consacrait aux armes biologiques visant en particulier les céréales : progression d'épidémies de rouille brune sur blé (due à *Puccinia recondita*) et aérobiologie appliquée à la dispersion de spores à longue distance.

D'autres maladies auraient été étudiées : rouille du maïs (due à *Puccinia sorghi*), virus de la mosaïque du tabac (TMV), virus de la mosaïque striée du blé (WSMV), et divers virus de la pomme de terre (Alibek et Handelman, 1999).

Officiellement, les travaux liés à ces armes prirent fin à la suite du décret d'avril 1992 du Président Eltsine, abolissant le programme de guerre biologique de la Russie.

La Carie du blé testée

Grâce aux preuves dévoilées par la Commission spéciale des Nations Unies sur l'Irak (CSNU), les efforts déployés par cet État pour mettre au point des armes biologiques anti-culture furent mis au jour pour la première fois en 1995. La CSNU qualifia ces recherches de tentative pour acquérir une arme « économique » contre les États voisins. Ces recherches irakiennes commencées dans les années 70 se sont intensifiées entre 1985 et 1991. Plusieurs champignons pathogènes auraient été testés sur des parcelles de céréales en 1985 et 1988.

Dans ce contexte, la carie du blé (photo p. 8) revêtait un intérêt particulier. L'Irak, pays voisin pour lequel le blé constitue une denrée essentielle, figurait vraisemblablement sur la liste des cibles prioritaires entre les années 80 et 90.

Cette maladie provoquée par le champignon *Tilletia tritici* réduit les rendements et, accessoirement, peut entraîner la production d'un gaz inflammable, la triméthylamine, susceptible de provoquer l'explosion des moissonneuses récoltant des grains contaminés. Il suffit surtout de quelques épis atteints (environ un pour mille seulement) pour déclasser toute une récolte, qui ne peut alors dans le meilleur des cas que servir de fourrage au bétail. L'odeur pénétrante de pourriture émanant des épis malades, due à cette même substance (la triméthylamine) toxique pour l'homme et les animaux, rend la totalité de la récolte impropre à la consommation.

Des cargaisons de graines destinées à l'alimentation peuvent propager l'infection. La contamination, longtemps invisible, n'est révélée que lorsque les épis débutent leur maturation. À l'heure actuelle, cette maladie est rare en Europe mais cause encore des ravages importants dans les pays en voie de développement.

Depuis le milieu des années 70 plusieurs groupes terroristes basés à l'étranger ont tenté ou menacé de contaminer des exportations alimentaires destinées à des consommateurs nord-américains et européens. Dans les années 80, un groupe de militants tamouls peut-être soutenu par le gouvernement indien, aurait menacé de disperser des agents pathogènes visant les plantations d'hévéa et de thé au Sri Lanka (Kohnen, 2000). L'avènement d'une telle action n'a jamais été vérifié dans les faits.

Mycoherbicides, à la croisée des chemins de la drogue et de l'agro-terrorisme

Les États-Unis, en collaboration avec l'ONU, songent depuis quelques années à disséminer sur de vastes territoires un champignon d'origine tellurique s'attaquant à la culture du cocaïer, plante dont on extrait la cocaïne, et lutter ainsi contre la culture illégale de drogues.

Séduisant contre la drogue...

Le champignon appartient à l'espèce *Fusarium oxysporum*. Il est largement répandu dans le monde mais ses divers biotypes ont une très grande spécificité d'hôte. La race EN-4 (*f. sp. erythroxyli*) ne s'attaque ainsi qu'aux plants de

coca (*Erythroxylum spp.*) (Sands *et al.*, 1997). D'autres races capables de s'attaquer au pavot (*Papaver somniferum*) dont on extrait l'héroïne, ou au chanvre (*Cannabis sativa*) à l'origine de la marijuana, ont été mises en évidence (McCarty *et al.*, 1995 ; Hildebrand et McCain, 1978).

Au contraire des herbicides chimiques, également utilisés en Amérique du Sud pour lutter contre la culture illégale de la coca, *F. oxysporum* EN-4 peut se conserver des dizaines d'années dans les sols des régions où il s'installe. Il suffit donc de le disséminer, par exemple en répandant des grains de riz ou d'orge contaminés à partir d'un avion, pour compromettre sérieusement la culture du cocaïer sur de vastes territoires durant une longue période. Plusieurs travaux financés par les États-Unis (USDA) visent à optimiser la préparation et l'efficacité de l'inoculum (Hebbar *et al.*, 1997 ; Connick *et al.*, 1998).

...mais inquiétant pour des cultures non cibles

L'approche est séduisante mais inquiétante : on connaît les capacités colonisatrices de certains champignons pathogènes d'origine tellurique. Et il subsiste des doutes sur l'innocuité des biotypes sélectionnés vis-à-vis d'autres plantes appartenant aux mêmes familles botaniques.

Même si les races de *F. oxysporum* utilisées ne provoquent pas de dégâts sur d'autres types de culture, cette méthode de lutte pourrait se transformer en désastre écologique pour plusieurs zones agricoles de Colombie, Pérou, Bolivie ou Brésil qui cultivent légalement le cocaïer pour des applications industrielles.

Si les effets directs de l'agent pathogène sur un ensemble d'espèces végétales sont *a priori* bien identifiés, ses effets chroniques le sont beaucoup moins : aucun élément d'épidémiologie ne permet d'évaluer à l'heure actuelle le risque de déplacement involontaire du champignon dans des zones non contaminées. L'existence de tels risques est soutenue par de nombreux pathologistes.

L'USDA a essayé de convaincre des pays producteurs de coca d'Amérique du Sud comme la Colombie de lui permettre d'effectuer des expériences sur place en conditions naturelles, jusqu'à présent en vain. Alors que l'ONU semble depuis peu prendre ses distances avec les propositions d'application américaines dans les Andes et que le Parlement Européen s'y est clairement opposé, il est probable que la crise civile actuelle en Colombie soit un argument supplémentaire aux yeux des États-Unis. L'intervention d'un parlementaire au congrès américain en décembre 2002, proposant l'utilisation prochaine du mycoherbicide en Colombie (« agent vert » pour ses détracteurs), va dans ce sens (The Sunshine Project, 2002).

À noter qu'en 1999 une proposition de pulvérisation de *F. oxysporum* sur des cultures illicites de cannabis dans la région des Everglades en Floride, pourtant en conditions contrôlées, suscita une controverse locale, les critiques qualifiant l'action de « guerre biologique » et avertissant que le champignon pourrait attaquer d'autres espèces végétales.



Fleur de pavot. (ph. Madzak, INRA)

Le pavot visé

L'USDA continue de collaborer avec les Nations Unies sur un autre programme d'utilisation de champignons pour contrôler la croissance des plants de pavot en Asie Centrale. L'ONU estimait en 1999 que 250 000 Afghans pourraient être impliqués dans la production d'opium et qu'un bon million d'entre eux dépendraient de son commerce pour vivre.

À l'origine, il s'agissait d'un programme de recherches russe sur le champignon *Pleospora papaveracea*, capable de s'attaquer à des cultures d'Opiacées (Bailey *et al.* 2000). *P. papaveracea*, présent dans le sud de l'Europe et en Asie, est relativement peu agressif. Soutenu par les États-Unis et la Grande Bretagne, un institut de recherche ouzbèke à l'origine de la découverte (Institut of Genetics, Tashkent) cherche à développer les potentialités de ce champignon pour lutter contre la culture du pavot dans le monde (The Sunshine Project, 2001). Cette arme biologique est ouvertement pressentie pour être appliquée dans des régions d'Afghanistan, Tadjikistan et Birmanie, où se concentraient jusqu'ici les plus grandes surfaces cultivées en pavot.

Bombe écologique

La Grande Bretagne et l'Ouzbékistan envisagent des transferts de technologie portant sur la formulation d'une solution pathogène facile à pulvériser, ainsi que des recherches épidémiologiques plus fondamentales (effet de la dispersion aérienne de spores sur la cinétique des épidémies et accroissement des effets au moyen d'une pulvérisation artificielle dans les airs). Un rapport confidentiel faisait état d'un potentiel de traitement atteignant 2 000 ha en 1998.

Les spores, une fois dispersées sur les champs, survivraient près de deux mois. Mais la version transgénique sur laquelle travaille l'institut ouzbèke pourrait être encore plus efficace une fois larguée par avion au-dessus des champs : une « bombe écologique », préviennent déjà certains mouvements écologistes. Argument balayé en 1999 par les responsables du programme affirmant avoir démontré l'innocuité du champignon incriminé sur 110 plantes différentes.

Les pathologistes les plus sceptiques doutent que les souches de ces divers champignons soient efficaces une fois libérées dans des écosystèmes complexes. D'autres se disent inquiets qu'une telle intervention n'établisse un précédent dan-

gereux, en tant que violation possible de la Convention sur les armes biologiques et à toxines (CABT), si des agents pathogènes étaient employés sans le consentement du pays hôte, et du fait du transfert de connaissances précieuses à ceux qui seraient enclins à se livrer à une guerre biologique contre des cultures « autorisées ».

Deux questions

L'ONU évalue en effet à 29 000 ha la surface des plantations légales de coca au Pérou et en Bolivie. Des cultures légales de pavot sont présentes au Japon, en Chine, Turquie, Australie, France et Espagne. La plupart sont destinées à l'industrie pharmaceutique. Qu'arriverait-il si *F. oxysporum* contaminait ces parcelles ?

Et qu'advient-il des publications présentant ces travaux scientifiques à l'heure où de nombreuses revues internationales se sont engagées à ne pas publier d'informations sensibles utilisables à des fins terroristes ? Les résultats de ces programmes contiennent-ils des connaissances pouvant être détournées ?

Quelles réponses aux menaces ?

Les risques majeurs

L'évolution de l'agriculture sur les continents européen et nord-américain est un autre facteur de vulnérabilité vis-à-vis des terroristes. Globalement, les sites agricoles constituent des cibles : ils ne sont pas protégés, et de plus il est facile de se procurer des matières infectieuses et de les disséminer.

Un phytopathologiste de l'Université de l'État d'Ohio, Larry Madden, a décrit avec quelle facilité une maladie pourrait être introduite dans les cultures aux États-Unis (Madden et Van den Bosch, 2002). Un faible volume de semences infectées suffirait pour causer des dégâts, et il est selon lui peu probable que les services d'inspection gouvernementaux puissent le déceler. En parallèle, sur d'autres continents, les scientifiques découvrent des agents phytopathogènes émergents. Comme pour les humains, les déplacements internationaux de matériel végétal et l'affaiblissement des obstacles au commerce accroissent la possibilité de propagation de maladies inconnues au-delà des frontières.

Il est probable que les pays industrialisés aient les moyens financiers et techniques d'identifier précocement la survenue d'une maladie et d'enrayer l'épidémie à l'aide de mesures prophylactiques ou curatives. Certaines situations pourraient néanmoins s'avérer très problématiques, en particulier l'introduction d'agents pathogènes dits de « quarantaine », absents du territoire.

Les pays en voie de développement sont, eux, beaucoup plus démunis.

Par exemple, la carie du Karnal, due à *Tilletia indica* (champignon parent de la carie commune européenne) limitée d'abord au Nord de l'Inde et au Pakistan, est apparue en 1996 dans le Wisconsin (USA). Les États-Unis et le Canada étant d'importants exportateurs de blé, ce phénomène est particulièrement inquiétant. Nous pouvons faire intervenir ici la problématique de

redistribution d'excédent de production des nations industrialisées vers les pays en voie de développement soumis à des conditions climatiques défavorables et menacés de famine. La circulation du blé facilite en effet la propagation de maladies transmissibles par les semences et les grandes quantités transportées ne peuvent être traitées chimiquement car elles seraient déclarées impropres à la consommation.

Vulnérabilité économique

La vulnérabilité du secteur agricole trouve aussi ses racines dans son poids économique (10 à 15 % du produit national brut en Europe et aux États-Unis) et dans les dommages éventuels que causerait une attaque agro-terroriste. En Europe, l'introduction de maladies minerait la confiance que l'opinion publique a dans les réserves alimentaires et entraînerait une crise dans les marchés de consommation et d'exportation.

Nécessité d'une chaîne de surveillance efficace

Parmi certaines propositions visant à améliorer la capacité de réaction, on compte l'amélioration des services de renseignement, de nouvelles méthodes pour différencier les événements déclenchés naturellement des contaminations délibérées, un système de dépistage et de caractérisation des agents pathogènes permettant de diagnostiquer et signaler plus rapidement les épidémies, et enfin une amélioration de la capacité de surveillance générale par des experts.

Il est souhaitable que les mesures principales concernent dans un premier temps les organismes de quarantaine et assimilés.

Les critères rendant des agents pathogènes utilisables à des fins terroristes incluent leur facilité de production et manipulation, leur capacité à se propager et à survivre, leur vulnérabilité à la détection et au contrôle, et les dommages qu'ils peuvent causer. La propagation d'une épiphytie est la résultante encore largement imprévisible de paramètres épidémiologiques liés à l'agent infectieux (virulence, pathogénicité, résistance), à l'hôte (sensibilité, protection naturelle ou acquise, importance agronomique, répartition géographique) et aux conditions météorologiques (température, humidité, vent).

Système planétaire

Des scientifiques estiment qu'il serait utile de posséder un système planétaire effectuant le suivi et la caractérisation des agents pathogènes, tout en diagnostiquant et en déclarant rapidement les épidémies. La capacité de localiser l'origine géographique d'une épidémie, vraisemblablement au moyen d'une structure moléculaire témoin, faciliterait grandement la lutte.

Des recherches vont déjà dans ce sens, certaines soutenues par la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), agence chargée du financement d'actions liées à la défense du territoire américain. Elle envisage de financer un projet de l'Université du Colorado visant à créer des végétaux spécifiquement modifiés pour changer de couleur au contact de certains agents biologiques susceptibles d'être utilisés lors d'at-

taques bioterroristes. Plus tôt les spécialistes pourraient établir qu'une attaque a eu lieu, plus tôt on pourrait prendre des mesures.

Bien entendu le contrôle approfondi des maladies végétales existe déjà, en particulier par la gestion concertée des organismes de quarantaine, mais la menace de terrorisme n'est pas une priorité du monde agricole. De nouvelles initiatives pourraient donc viser à faire le lien entre les efforts locaux et nationaux, et les contrôles multilatéraux déjà en vigueur.

Les négociateurs du protocole de vérification de la CABT ont ainsi détaillé les procédures à suivre dans le cadre d'une enquête type portant sur des épidémies végétales ou animales.

Plusieurs pays (États-Unis, Canada, Australie, Afrique du Sud), qui limitent déjà le commerce des articles reliés aux armes chimiques et biologiques à double usage, ont récemment complété et proposé des listes d'agents pathogènes à contrôler. La démarche a été relayée par des associations scientifiques (American Phytopathological Society) (APSnet Feature, 2002). Les institutions supranationales spécialisées desquelles émane l'IPPC (International Plant Protection Convention), n'ont à notre connaissance pas encore pris de position spécifique à ce sujet. Les agents biologiques concernés sont majoritairement assimilés à des organismes de « quarantaine » préjudiciables aux agrosystèmes des pays industrialisés.

Les craintes pour les cultures vivrières des pays en voie de développement sont bien autres. Selon un rapport de l'ONU de la fin des années 90, dix principales maladies seraient à redouter, dont la rouille du blé, le charbon de la canne à sucre et la pyriculariose du riz. Le maïs, les pommes de terre, de nombreuses variétés de haricots, divers fruits et le café seraient aussi menacés. On peut y ajouter les pins, économiquement importants pour le bois d'œuvre.

Enfin, une surveillance des travaux portant sur le génome des plantes et ses interactions avec des agents pathogènes, qui pourraient être détournés vers la conception d'armes plus efficaces contre

les cultures, paraît également souhaitable. Diverses techniques permettent de créer des organismes nuisibles plus robustes, plus résistants aux pesticides classiques ou survivant à des conditions climatiques plus larges.

Importance d'un engagement du secteur de la protection des plantes

Depuis que des recherches sur la guerre biologique ont débuté dans les années 20, les pays cherchant à mettre au point des armes biologiques ont étudié beaucoup d'agents pathogènes visant exclusivement des objectifs agricoles. Même si de nombreux États ont officiellement mis fin à leurs programmes, la vérification est incomplète et des doutes subsistent quant à la légitimité de tous les travaux réalisés dans les sites anciennement consacrés à de telles armes.

Vu l'importance de l'agriculture pour la prospérité de notre pays, vu son statut de cible « vulnérable » et le contenu relativement faible en technologie du terrorisme biologique visant les cultures, des groupes extrémistes pourraient estimer cette forme d'attaque plus facile et plus sûre que le ciblage d'objectifs humains. Jusqu'à présent, le secteur « civil » de la protection des cultures (organismes de recherche et développement, industrie phytosanitaire, institutions publiques) s'est senti peu concerné et peu d'efforts concertés ont été spécifiquement déployés pour alimenter le débat portant sur l'usage délibéré d'agents phytopathogènes.

Un réseau de surveillance épidémiologique et de lutte contre les maladies transmissibles a certes été instauré dans l'Union Européenne en 1998, mais, dans une communication au Parlement européen (Bruxelles, 28/11/2001), la Commission suggère que la capacité de ce réseau à signaler les phénomènes épidémiques soit renforcée de façon urgente. Depuis, un appel d'offre du Ministère de la Recherche français a été relayé par l'INRA sur « *Microbiologie fondamentale et appliquée, maladies infectieuses, environnement et bioterrorisme* ».

Centralisation des connaissances épidémiologiques

Un article précédent avait souligné l'intérêt des travaux en épidémiologie végétale : l'étude des dynamiques spatiales et temporelles des épidémies devra en effet être au cœur des programmes de surveillance (Suffert, 2002). Les interventions possibles sont différentes selon que l'on s'adresse à des épidémies aériennes ou telluriques.

Les épidémies aériennes, s'attaquant aux feuilles, tiges ou fruits, se transmettent souvent très rapidement d'une parcelle à l'autre, mais sont en général limitées dans le temps à l'échelle d'une saison. La dispersion de spores par voie aérienne peut se faire à plus de 10 km d'altitude et sur des distances pouvant atteindre 1 000 km.

Les épidémies de nature tellurique (agents pathogènes présents dans le sol) progressent moins vite dans l'espace, mais contaminent plus durablement les sols, pouvant ainsi être responsables d'épidémies chroniques.

Le cas des molécules interdites

Un sujet concernant directement le secteur de l'industrie de la protection des plantes mérite d'être soulevé : le retrait du marché de nombreux produits phytosanitaires qui doit intervenir prochainement, signifie que leur usage sera définitivement interdit, quelle qu'en soit la raison, et ce même en cas de nécessité majeure liée à l'apparition d'une nouvelle maladie. N'est-il finalement pas problématique que le législateur ait choisi d'être aussi radical dans sa volonté de réglementer ?

La question mérite d'être posée afin que nous ne soyons pas techniquement et juridiquement démunis le moment opportun.

Il pourrait en effet s'avérer utile de définir des conditions exceptionnelles de fabrication, stockage et utilisation de certaines matières actives efficaces, malgré leur interdiction future, en prévision de l'arrivée soudaine d'une nouvelle maladie sur le territoire.

Le type et le niveau d'expression du parasitisme sur la plante sont fonction des caractéristiques intrinsèques de chaque bioagresseur, mais aussi de l'environnement (climat, sol, système de culture) dans lequel ils s'exercent. Rappelons par ailleurs que certaines maladies bactériennes sont transmises par l'eau (pluie, irrigation, splashing, ruissellement) et que d'autres, d'origine virale, peuvent être transmises par des insectes vecteurs qu'il faut également surveiller.

Modélisation à grande échelle

Face à cette diversité d'épidémies, avant d'envisager une stratégie prophylactique ou de lutte curative au champ, il est indispensable de bien identifier la cible. Cela suppose de disposer de connaissances scientifiques adéquates, de méthodologies propres à l'étude des agents pathogènes ainsi que d'outils fiables et suffisamment performants pour traduire leurs réponses en terme de risque pour la culture.

La modélisation à grande échelle, qui se fait actuellement dans une perspective « civile » de protection intégrée doit permettre d'évaluer des risques sur un vaste territoire agricole.

Plusieurs modèles d'épidémies transnationales ou pandémies ont permis d'expliquer et de maîtriser des phénomènes dynamiques à grande échelle. L'exemple de la stratégie de lutte contre le chancre des *Citrus* (*Xanthomonas axonopodis*) en Floride en est une bonne illustration (Gottwald *et al.*, 2001).

Dans des cas de dispersion à courte distance, les stratégies d'éradication n'ont une chance de réussir que si le foyer d'infection est petit, identifié et traité de façon précoce. n

Remerciements : au Professeur Guy Raynal pour sa relecture et les corrections qu'il a pu apporter au manuscrit.

Summary

VOLUNTARY USE OF PHYTOPATHOGEN AGENTS TO DESTROY CROPS

Anticrops weapons and agroterrorism : consequences for plant protection

Because agroterrorist attack requires relatively little specialized expertise and technology, it could be a serious threat to our agriculture. It can have large economic repercussions.

This article gives an overview of the vulnerability of different countries to agricultural bioterrorism, especially to plant diseases in the past through an historical chronicle and in the future through a prospective reflexion. Our objective is here to describe what kind of diseases and epidemics have been worked out in the past, what could be used in the future and why.

Several countries developed or are developing biological warfare against crops or agroterrorism programs, but with different objectives. It is easy to rank a disease among anticrops weapons, and we show that bio-war against drug crops with mycoherbicides could be seen as an biological attack. We describe the history of this agricultural warfare, especially during the First World War and since the Cold War, and the epidemiological aspects of biological arms control.

These control strategies for crop diseases depend on the epidemiology of a particular disease and on the cropping system. Dangerous diseases are not the same today than in the past, they differ in industrialized and developing countries.

Key words : agroterrorism, anticrops weapons, epidemiology, pathogens plant agents, quarantine pest, mycoherbicide, *Fusarium oxysporum*, *Pleospora papaveracea*, *Phytophthora infestans*, *Puccinia* spp., *Tilletia indica*, *Magnaporthe grisea*.

Résumé

Compte tenu de l'importance de l'agriculture dans la prospérité d'un pays, de son statut de cible « vulnérable », et du contenu relativement faible en technologie du terrorisme biologique visant les cultures, de telles attaques auraient de larges répercussions économiques.

Cette synthèse propose un aperçu de la vulnérabilité de différents pays à ce type d'attaques, en particulier vis-à-vis des agents phytopathogènes, au travers d'une chronique historique et d'une réflexion prospective. L'objectif est de présenter les principales maladies qui ont été étudiées dans le passé, celles qui pourraient l'être dans le futur, et les enjeux qui en découlent.

Plusieurs pays ont développé et développent encore des programmes anti-culture, avec des finalités variées. Il est aisé d'assimiler une maladie à une arme potentielle ; la guerre biologique contre la culture des drogues à l'aide de mycoherbicides pourrait également en faire partie. La chronologie de différents programmes est exposée, en particulier ceux de la Seconde Guerre mondiale et de la Guerre froide, ainsi que les aspects épidémiologiques du contrôle de ces armes biologiques.

Les stratégies de protection contre des attaques dépendent de nombreux éléments d'épidémiologie, donc de la maladie elle-même et de la culture cible. Les risques du passé ne sont pas les mêmes que ceux encourus aujourd'hui, de même qu'ils diffèrent entre les agrosystèmes des pays industrialisés et ceux en voie de développement.

Mots-clés : agroterrorisme, armes anti-culture, épidémiologie, agents phytopathogènes, organismes de quarantaine, mycoherbicide, *Fusarium oxysporum*, *Pleospora papaveracea*, *Phytophthora infestans*, *Puccinia* spp., *Tilletia indica*, *Magnaporthe grisea*.

Bibliographie

- AGNET, 2002 - Kernal bunt in the news again. Canadian Phytopathological Society. <http://www.cps-scp.ca/kernal-bunt.htm>
- APSNET FEATURE, 2002 - Crop biosecurity and countering agricultural bioterrorism : responses of the American Phytopathological Society. www.apsnet.org/online/feature/bioterrorism/
- ALIBEK K. ET HANDELMAN S., 1999 - The Soviet Union's anti-agricultural biological weapons. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 894: 18-19.
- BAILEY B.A., APEL-BIRKHOLO P.C., AKINGBE O.O., RYAN J.L., O'NEILL N.R. ET ANDERSON J.D., 2000 - *Nep1* protein from *Fusarium oxysporum* enhances biological control of opium poppy by *Pleospora papaveracea*. *Phytopathology*, 90 (8): 812-818.
- CONNICK W.J., DAIGLE D.J., PEPPERMAN A.B., HEBBAR K.P., LUMSDEN R.D., ANDERSON T.W. ET SANDS D.C., 1998 - Preparation of stable, granular formulations containing *Fusarium oxysporum* pathogenic to narcotic plants. *Biological Control*, 13: 79-84.
- GOTTWALD T.R., HUGHES G., GRAHAM J.H., SUN X. ET RILEY T., 2001 - The citrus canker epidemic in Florida : the scientific basis of regulatory eradication policy for an invasive species. *Phytopathology*, 91: 30-34.
- HEBBAR K.P., LUMSDEN R.D., POCH S.M. ET LEWIS J.A., 1997 - Liquid fermentation to produce biomass of mycoherbicidal strains of *Fusarium oxysporum*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 48: 714-719.
- HILDEBRAND D.C. ET MCCAIN A.H., 1978 - The use of various substrates for large-scale production of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cannabis* inoculum. *Phytopathology*, 68: 1099-1101.
- KOHNEN A., 2000 - Responding to the threat of agroterrorism : specific recommendations for the USDA. ESDP-2000-04 / BCSIA-2000-29. http://ianrhome.unl.edu/inthenews/resources/bscia_recommendations.pdf
- LINE R.F. ET GRIFFITH C.S., 2001 - Research on the epidemiology of stem rust of wheat during the Cold War. *Stem rust of wheat*. American Phytopathological Society, St Paul USA, 83-118.
- MADDEN L.V. ET VAN DEN BOSCH F., 2002 - A population-dynamic approach to assess the threat of plant pathogens as biological weapons against annual crops. *Bioscience*, 52: 65-74.
- MARGOLIAN M., 2000 - Le terrorisme biologique agricole : l'expérience américaine. http://www.dnd.ca/admpol/org/dg_plan/d_strat/bio_terror_f.htm
- MATES M., 1999 - Rapport pour la commission des sciences et des technologies de l'Assemblée parlementaire de l'OTAN.
- MCCARTY M.K., PILGERAM A.L., ANDERSON T.W., SCHULTZ M.T., DOLGOWSKAYA M. ET SANDS D.C., 1995 - An effective and host specific pathogen of *Papaver* spp. *Phytopathology*, 85: 1118.
- ROGERS P., WHITBY S. ET DANDO M., 1999 - Biological warfare against crops. *The Scientific American*, 280 (6): 70-75.
- SANDS D.C., FORD E.J., MILLER R.V., SALLY, B.K., MCCARTY M.K., ANDERSON T.W., WEAVER M.B., MORGAN C.T. ET PILGERAM A.L., 1997 - Characterization of a vascular wilt of *Erythroxylum coca* caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *erythroxyli* forma *spacialis* nova. *Plant Disease*, 81: 501-504.
- SUFFERT F., 2002 - L'épidémiologie végétale, nouvelle discipline de guerre ? Lumière sur le bioterrorisme agricole, un enjeu émergent pour la recherche agromique. Le Courrier de l'Environnement de l'INRA, 47: 57-69.
- WHEELIS M., CASAGRANDE R. ET MADDEN L., 2002 - Biological attack on agriculture : low-tech, high-impact bioterrorism. *Bioscience* 52 (7): 569-576.
- THE SUNSHINE PROJECT, 2001 - Background series, n°4. Risks of using biological agents in drug eradication, <http://www.sunshine-project.org/>
- THE SUNSHINE PROJECT, 2002 - News release. New US biowarfare threat on colombia US legislators renew calls for bio-attack on illicit crops, 12 décembre 2002. <http://www.sunshine-project.org/>
- THE SUNSHINE PROJECT, 2003 - News release. US patents biological weapons delivery system, violates biological weapons convention, 8 mai 2003. <http://www.sunshine-project.org/>