

COMMUNAUTE FRANCAISE DE BELGIQUE  
ACADEMIE UNIVERSITAIRE WALLONIE-EUROPE  
FACULTE UNIVERSITAIRE DES SCIENCES AGRONOMIQUES DE GEMBLoux

**ETUDE DES PRINCIPAUX PARAMETRES PERMETTANT  
UNE EVALUATION ET UNE REDUCTION DES RISQUES  
D'EXPOSITION DES OPERATEURS LORS DE  
L'APPLICATION DE TRAITEMENTS PHYTOSANITAIRES  
EN CULTURE MARAÎCHERE ET COTONNIERE AU  
SENEGAL**

Tanor NDAO

Dissertation originale présentée en vue de l'obtention du grade  
de docteur en sciences agronomiques et ingénierie biologique

Promoteurs : Pr. Marie France Destain  
Pr. Bruno Schiffers

2008

NDAO Tanor. (2008). Etude des principaux paramètres permettant une évaluation et une réduction des risques d'exposition des opérateurs lors de l'application de traitements phytosanitaires en culture maraîchère et cotonnière au Sénégal (thèse de doctorat). Gembloux, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques, 196 p., 25 tabl., 43 fig.

Résumé : Au Sénégal, dans les zones maraîchère (zone des « Niayes ») et cotonnière, le traitement des cultures se fait respectivement avec des pulvérisateurs à dos et avec des cannes centrifuges. Des enquêtes ont été réalisées sur le terrain et un ensemble de paramètres comme le temps d'application et de rinçage, les surfaces traitées, les volumes appliqués, la température et la vitesse du vent, ... ont été mesurés pour analyser les facteurs de risque encourus par les opérateurs. L'analyse statistique des résultats montre que les risques de contamination des opérateurs sont importants. En effet, en se référant à la classification établie par l'OMS, plusieurs produits sont classés hautement dangereux. Le faible niveau de formation des opérateurs ne leur permet pas de prendre connaissance des informations concernant l'utilisation correcte des produits. Les techniques d'application sont insuffisamment maîtrisées, l'application n'est pas réalisée au moment où les conditions climatiques sont les plus favorables et les opérateurs travaillent sans aucune protection.

Des mesures d'exposition simulant les conditions de travail rencontrées en régions maraîchère et cotonnière ont été effectuées dans un tunnel aérodynamique. Qu'il s'agisse du pulvérisateur à dos ou de la canne centrifuge, la position qui expose le moins l'opérateur est la position latérale par rapport au vent. Avec le pulvérisateur à dos, la contamination se produit essentiellement au niveau des tibias, tandis qu'avec la canne centrifuge, la contamination est généralisée à l'ensemble des parties corporelles. La présence de végétation augmente l'exposition par rapport à la pulvérisation sur sol nu. Ces mesures permettent d'une part de proposer un équipement de protection adapté en fonction du type de pulvérisation réalisée et d'autre part d'estimer l'exposition spécifique dermique de l'opérateur pendant l'application des pesticides.

Synthétisant les mesures de terrain et celles réalisées en tunnel aérodynamique, un modèle estimant l'exposition du corps par voie dermique pendant la phase d'application est proposé pour le Sénégal. Il se base sur les principes généraux de calcul d'exposition adoptés dans les modèles déterministes européens. Partant de ce modèle, les doses moyennes absorbées sont estimées à 1,40 et 19,64 mg de substance active par personne et par jour, respectivement avec un pulvérisateur à dos et une canne centrifuge. Avec un équipement de protection individuelle, l'estimation conduit à des valeurs dix fois plus faibles.

NDAO Tanor. (2008). Analysis of the essential parameters for assessment and reduction risk exposure of operators during pesticide application in vegetable crop and cotton culture in Senegal (Thèse de doctorat in French). Gembloux, Belgium, Gembloux Agricultural University, 196 p., 25 tabl., 43 fig.

Summary : In Senegal, and particularly in the vegetables production region (Niayes) and in the cotton production region, applications of pesticides are done manually with sprayers or with ULVA. On-farm survey and collected data (application rate, treated area, temperature, wind speed, ...) show that the operators' risk of contamination is high because of the high toxicity of the pesticides according the World Health Organization classification, the weakness of training level, the non-respect of pesticide regulations and the non-application of personal protective equipment.

Operator dermal exposure was measured in wind tunnel in climatic conditions similar to Senegalese conditions. The most favourable position was found when the direction of the wind is perpendicular to the operator travel movement. With manual sprayer, most of the contamination was located on legs, whereas the contamination concerned the whole body with ULVA. The vegetation increased the contamination level. Thanks to these results, appropriate personal protective equipment was suggested for both kinds of treatments.

Taking into account the field measurements and the wind tunnel measured exposures, a model estimating the dermal risk during the application in Senegal conditions was proposed on basis of the methodology used in European deterministic models. The mean values of the calculated dermal exposures were 1,40 and 19,64 mg of active ingredient/(person x day) respectively with a manual sprayer and a ULVA. Using an appropriate personal protective equipment, the estimation is 10 times lower.

Copyright. Aux termes de la loi belge du 30 juin 1994, sur le droit d'auteur et les droits voisins, seul l'auteur a le droit de reproduire partiellement ou complètement cet ouvrage de quelque façon et forme que ce soit ou d'en autoriser la reproduction partielle ou complète de quelque manière et sous quelque forme que ce soit. Toute photocopie ou reproduction sous autre forme est donc faite en violation de la dite loi et des modifications ultérieures.

## SOMMAIRE

<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>8</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>10</b>
<b>SIGNIFICATION DES PRINCIPAUX SIGLES.....</b>	<b>13</b>
<b>CHAPITRE 1 : INTRODUCTION .....</b>	<b>13</b>
<b>CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 INTRODUCTION.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2 GENERALITES SUR LES PRODUITS PHYTOSANITAIRES.....</b>	<b>16</b>
2.2.1 DEFINITION .....	16
2.2.1 COMPOSITION DES PRODUITS PHYTOSANITAIRES.....	17
<b>2.3 LA DERIVE DES PRODUITS PHYTOSANITAIRES .....</b>	<b>18</b>
2.3.1 DEFINITION DE LA DERIVE .....	18
2.3.2 FACTEURS INFLUENÇANT LA DERIVE.....	18
2.3.3 QUANTIFICATION DE LA DERIVE .....	22
2.3.3.1 <i>Mesure de la dérive en milieu contrôlé</i> .....	22
2.3.3.2 <i>Mesure de la dérive sur le terrain</i> .....	24
2.3.4 MODÉLISATION DE LA DÉRIVE.....	25
<b>2.4 LES RISQUES CREEES PAR LES PRODUITS PHYTOSANITAIRES.....</b>	<b>26</b>
2.4.1 NOTIONS DE BASE .....	26
2.4.2 LES RISQUES POUR LA SANTE .....	31
2.4.2.1 <i>L'exposition des opérateurs et des travailleurs</i> .....	32
2.4.2.2 <i>L'exposition des « bystanders »</i> .....	33
2.4.2.3 <i>Les effets de l'intoxication</i> .....	34
2.4.3 LES RISQUES POUR L'ENVIRONNEMENT .....	36
<b>2.5 LES METHODES D'ESTIMATION DE L'EXPOSITION DES OPERATEURS AUX PRODUITS PHYTOSANITAIRES .....</b>	<b>37</b>
2.5.1 LES MÉTHODES QUANTITATIVES.....	37
2.5.1.1 <i>Méthode des patchs</i> .....	37
2.5.1.2 <i>Méthode de mesure sur l'ensemble du corps (« Whole body methods »)</i> .....	39
2.5.1.3 <i>Mesures sur les mains</i> .....	39
2.5.1.4 <i>Mesures respiratoires</i> .....	40
2.5.1.5 <i>Le monitoring biologique</i> .....	40
2.5.2 MÉTHODE QUALITATIVE PAR ANALYSE D'IMAGES .....	41
2.5.3 MODÉLISATION DE L'EXPOSITION .....	41
<b>2.6 CONCLUSION.....</b>	<b>51</b>
<b>CHAPITRE 3 : L'APPLICATION DES PRODUITS PHYTOSANITAIRES AU SENEGAL .....</b>	<b>53</b>
<b>3.1 INTRODUCTION.....</b>	<b>53</b>
<b>3.2 LA REGLEMENTATION .....</b>	<b>53</b>
3.2.1 LA REGLEMENTATION AU NIVEAU INTERNATIONAL .....	53
3.2.2 LA REGLEMENTATION AU NIVEAU SOUS-REGIONAL.....	55
3.2.3 LA REGLEMENTATION AU NIVEAU NATIONAL.....	55
3.2.4 LE DISPOSITIF INSTITUTIONNEL POUR LA GESTION DES PESTICIDES .....	58
<b>3.3 L'UTILISATION DES PRODUITS PHYTOSANITAIRES AU SENEGAL.....</b>	<b>59</b>
3.3.1 LES IMPORTATIONS .....	59
3.3.2 LES INDUSTRIES DE PESTICIDES AU SENEGAL.....	60
3.3.3 LES CIRCUITS DE DISTRIBUTION.....	60
3.3.4 LES METHODES D'APPLICATION.....	61

3.3.4.1 L'utilisation par aspersion .....	61
3.3.4.2 Le traitement avec pulvérisateur à dos manuel ou à canne à pulvérisation centrifuge.....	61
3.3.4.3 Le traitement avec pulvérisateurs à dos motorisés.....	62
3.3.4.4 Le traitement avec pulvérisateurs à grande capacité montés sur véhicule.....	62
3.3.4.5 Le traitement par fert-irrigation.....	62
3.3.5 LES PRODUITS UTILISÉS .....	62
<b>3.4 CONCLUSION.....</b>	<b>63</b>
<b>CHAPITRE 4 : ANALYSE DES CONDITIONS D'APPLICATION DES PESTICIDES AU SENEGAL</b>	<b>65</b>
<b>4.1 INTRODUCTION.....</b>	<b>65</b>
<b>4.2 PRESENTATION DES ZONES D'ETUDE .....</b>	<b>65</b>
4.2.1 LA ZONE MARAICHERE .....	66
4.2.2 LA ZONE COTONNIERE.....	67
<b>4.3 MATERIELS ET METHODES .....</b>	<b>69</b>
4.3.1 SOURCE DE DONNEES .....	69
4.3.2 LE CHOIX DES SITES.....	71
4.3.3 MESURES ET OBSERVATIONS SUIVIES D'ENQUETES COMPLEMENTAIRES .....	71
4.3.4 ECHANTILLONNAGE .....	72
4.3.5 MESURES ET OBSERVATIONS DE TERRAIN .....	74
4.3.6 L'ENQUETE COMPLEMENTAIRE .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
4.3.7 LE TEST DE CONFORT ET D'ACCEPTABILITE DE L'EQUIPEMENT DE PROTECTION INDIVIDUEL TROPIC (EPI) .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
4.3.8 ANALYSE STATISTIQUE DES RESULTATS .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
4.3.9 LIMITES ET CONTRAINTES .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
<b>4.4 RESULTATS ET DISCUSSIONS .....</b>	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
4.4.1 ANALYSE DES FACTEURS DE RISQUE .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
4.4.1.1 Evaluation des niveaux de formation.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.4.1.2 Evaluation des matériels de traitement.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.4.1.3 Evaluation des produits de traitement.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.4.1.4 Evaluation des mesures de sécurité.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.4.1.5 Evaluation des conditions météorologiques .....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.4.2 SCÉNARIOS DE TRAVAIL ET PARAMÈTRES MESURÉS .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
4.4.2.1 Scénarios de travail rencontrés sur le terrain.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.4.2.2 Les paramètres obtenus pour les deux scénarios .....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.4.3 CONFRONTATION DES RÉSULTATS AUX PARAMÈTRES DES MODÈLES EUROPÉENS DE CALCUL D'EXPOSITION .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
4.4.3.1 Le temps de préparation.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.4.3.2 Le temps de pulvérisation.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.4.3.3 Le temps de rinçage.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.4.3.4 La surface pulvérisée.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.4.3.5 Conditionnement et formulation.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<b>4.5 CONCLUSION.....</b>	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
<b>CHAPITRE 5 : ESSAIS D'EXPOSITION EN TUNNEL AERODYNAMIQUE....</b>	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
<b>5.1 INTRODUCTION.....</b>	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
<b>5.2 MATERIELS ET METHODES .....</b>	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
5.2.1 PRESENTATION DU TUNNEL .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
5.2.2 LES APPAREILS DE TRAITEMENT UTILISES .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
5.2.2.1 Le pulvérisateur à dos à pression entretenue .....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.2.2.2 La canne à pulvérisation centrifuge .....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.2.3 LES REACTIFS UTILISES .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
5.2.4 LE DISPOSITIF DE MESURE .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
5.2.5 LES CONDITIONS DE REALISATION .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
5.2.5.1 Essais simulant les conditions maraîchères .....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>

5.2.5.2 Essais simulant les conditions cotonnières.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.2.6 COLLECTE DES ÉCHANTILLONS ET ANALYSE AU LABORATOIRE.....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
5.2.6.1 Collecte des échantillons.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.2.6.2 Méthode d'analyse.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.2.6.3 Préparation des solutions de référence.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<b>5.3 RESULTATS ET DISCUSSIONS .....</b>	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
5.3.1 QUANTITES DE SEL DE FLUORESCÉINE COLLECTÉ PAR UNITÉ DE SURFACE CORPORELLE .	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
5.3.1.1 Essai avec pulvérisateur à dos sans végétation.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.3.1.2 Essai avec pulvérisateur à dos avec végétation.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.3.1.3 Essai avec la canne à pulvérisation centrifuge.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.3.2 COMPARAISON DES ESSAIS PULVERISATEURS A DOS.....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
5.3.3 COMPARAISON ENTRE LES DEUX TYPES D'APPAREIL DE TRAITEMENT .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
5.3.4 ESTIMATION DE L'EXPOSITION THEORIQUE PAR VOIE CUTANÉE .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
<b>5.4 CONCLUSION.....</b>	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
<b>CHAPITRE 6 : LES BASES D'UN MODELE DE CALCUL D'EXPOSITION ADAPTE AUX CONDITIONS D'APPLICATION AU SENEGAL .....</b>	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
<b>6.1 INTRODUCTION.....</b>	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
<b>6.2 PRESENTATION DES MODELES D'EXPOSITION EUROPEENS.....</b>	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
6.2.1 PRINCIPES DE BASE.....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
6.2.1.1 Détermination de l'exposition potentielle.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
6.2.1.2 Détermination de l'exposition admissible pour l'opérateur.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
6.2.1.3 Comparaison de l'exposition potentielle et de l'exposition admissible... ..	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
6.2.2 LES MODÈLES EUROPÉENS .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
<b>6.3 APPLICATION DES MODELES HOLLANDAIS, BRITANNIQUE ET ALLEMANDS AUX DONNEES DU SENEGAL.....</b>	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
6.3.1 COMPARAISON DES MODELES .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
6.3.2 SENSIBILITE DES MODELES EUROPEENS AUX VARIABLES D'ENTREE .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
6.3.2.1 Les méthodes d'analyse de sensibilité .....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
6.3.2.2 Méthodologie.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
6.3.2.3 Résultats .....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<b>6.4 MISE AU POINT D'UN MODELE D'EXPOSITION ADAPTE AUX CONDITIONS DU SENEGAL .....</b>	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
6.4.1 PRINCIPES GÉNÉRAUX .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
6.4.2 LES PARAMÈTRES ET CONSTANTES .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
6.4.3 LES VARIABLES D'ENTRÉE.....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
6.4.4 PRÉSENTATION DU MODÈLE .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
6.4.5 APPLICATION DES DONNÉES DE TERRAIN AUX MODÈLES D'ESTIMATION DE L'EXPOSITION.....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
6.4.5.1 Les variables d'entrée.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
6.4.5.2 Résultats .....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<b>6.5 CONCLUSION.....</b>	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
<b>CHAPITRE 7 : CONCLUSION .....</b>	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>179</b>

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2.1. : SURFACE CORRESPONDANT A CHAQUE PARTIE CORPORELLE.....	38
TABLEAU 4.1. : NIVEAU DE FORMATION DES APPLICATEURS (ENQUETE 2006). ....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
TABLEAU 4.2. : LISTE DES PRODUITS RENCONTRES EN TRAITEMENT COTONNIER EN 2006. .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
TABLEAU 4.3. : LISTE DES PRODUITS RENCONTRES EN CULTURE MARAICHERE EN 2006. .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
TABLEAU 4.4. : PRESENTATION DES SCORES OBTENUS DES TESTS EPI EN ZONE MARAICHERE. .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
TABLEAU 4.5. : PRESENTATION DES SCORES OBTENUS DES TESTS EPI EN ZONE COTONNIERE. .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
TABLEAU 4.6. : LES LAVAGES IMMEDIATEMENT OBSERVES APRES TRAITEMENT ET LES EFFECTIFS DE LA POPULATION OBSERVES EN ZONE MARAICHERE. ....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
TABLEAU 4.7. : LES LAVAGES IMMEDIATEMENT OBSERVES APRES TRAITEMENT ET LES EFFECTIFS DE LA POPULATION OBSERVES EN ZONE COTONNIERE.	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
TABLEAU 4.8. : HAUTEURS DE PULVERISATION EN CENTIMETRE POUR LES SCENARIOS ENVISAGES.....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
TABLEAU 4.9. : TEMPS DE PREPARATION POUR LES SCENARIOS ENVISAGES (MIN). ....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
TABLEAU 4.10. : TEMPS DE PULVERISATION POUR LES SCENARIOS ENVISAGES (HEURES). .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
TABLEAU 4.11. : TEMPS DE RINÇAGE POUR LES SCENARIOS ENVISAGES (MIN). ....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
TABLEAU 4.12. : SURFACES JOURNALIERES TRAITEES (HA).....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
TABLEAU 4.13. : VOLUMES DE BOUILLIE EPANDUS POUR LES SCENARIOS ENVISAGES (LITRES/HA). ....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
TABLEAU 5.1. : QUANTITES MOYENNES DE SEL DE FLUORESCEINE COLLECTEES EN PULVERISATION A DOS SUR TRAITEMENTS SANS DE LA VEGETATION ( $\mu\text{G}/\text{CM}^2$ ). ....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
TABLEAU 5.2. : QUANTITES MOYENNES DE SEL DE FLUORESCEINE COLLECTEES EN PULVERISATION A DOS SUR TRAITEMENTS EN PRESENCE DE LA VEGETATION..	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
TABLEAU 5.3. : QUANTITES MOYENNES DE SEL DE FLUORESCEINE COLLECTEES EN PULVERISATION A LA CANNE CENTRIFUGE. ....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
TABLEAU 5.4. : QUANTITES DE SELS DE FLUORESCEINE ESTIMEE SUR LES PARTIES CORPORELLES EN $\mu\text{G}/\text{G}$ DE TRACEUR.....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
TABLEAU 6.1. : EXPOSITIONS SPECIFIQUES PENDANT LA PREPARATION (MG/(PERSONNE X KG S.A.)) [LUNDEHN ET AL., 1992]. ....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>

TABLEAU 6.2. : EXPOSITIONS SPECIFIQUES PENDANT L'APPLICATION (MG/(PERSONNE X KG S.A.)) [LUNDEHN ET AL., 1992]. .....**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

TABLEAU 6.3. : SYNTHESE DES CARACTERISTIQUES DES MODELES D'EXPOSITION DES OPERATEURS (SELON CASTELAIN ET VLEMINCKX, 2004)..**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

TABLEAU 6.4. : MODELE DE FEUILLE DE CALCUL D'EXPOSITION (EXPOSITIONS SPECIFIQUES EN MG/KG S.A.). .....**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

TABLEAU 6.5. : MODELE DE FEUILLE DE CALCUL D'EXPOSITION (EXPOSITIONS SPECIFIQUES EN ML/HEURES). .....**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

TABLEAU 6.6. : DOSES ABSORBEES (MG S.A./(PERSONNE X JOUR)) OBTENUES AVEC LE PULVERISATEUR A DOS POUR LES DIFFERENTS MODELES. ....**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

TABLEAU 6.7. : DOSES ABSORBEES (MG S.A./(PERSONNE X JOUR)) OBTENUES AVEC LA CANNE CENTRIFUGE POUR LES DIFFERENTS MODELES. ....**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

## LISTE DES FIGURES

FIGURE 2.1. : FORMATION DES GOUTTES DE PULVERISATION A LA SORTIE D'UNE BUSE DE PULVERISATION. A GAUCHE, PULVERISATION D'EAU; A DROITE, PULVERISATION DE LI-700 (BUSE ANTIDERIVE, P=3 BARS) [STAINIER., 2004].....	19
FIGURE 2.2. : SCHEMA MONTRANT LES VALEURS CRITIQUES CHOISIES DANS UNE DISTRIBUTION LOG-NORMALE COMME VALEURS DE SUBSTITUTION POUR LES MODELES MATHEMATIQUES .....	42
FIGURE 2.3. : LES ETAPES DE L'EVALUATION DE L'EXPOSITION DES OPERATEURS. ....	44
FIGURE3.1. : EVOLUTION DES IMPORTATIONS DE PESTICIDES AU SENEGAL (MEF/DIRECTION DE LA PREVISION ET DE LA STATISTIQUE).....	59
FIGURE 4.1. : CARTE DU SENEGAL AVEC LES ZONES DE L'ETUDE.....	66
FIGURE 4.2. : PHOTOS DE PREPARATION DE LA BOUILLIE SUR LE TERRAIN. ....	75
FIGURE 4.3. : OBSERVATEUR CHRONOMETRANT LE TEMPS D'APPLICATION. ....	75
FIGURE 4.4. : RINÇAGE D'UN PULVERISATEUR APRES L'APPLICATION. ....	76
FIGURE 4.5. : HAUTEURS DE PULVERISATION EN PULVERISATION A DOS ET A LA CANNE CENTRIFUGE. ....	77
FIGURE 4.6. : MESURE DES CONDITIONS METEOROLOGIQUES. ... <b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>	
FIGURE 4.7. : 3 LIEUX DE STOCKAGES DES PRODUITS PHYTOSANITAIRES. .... <b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>	
FIGURE 4.8. : OPERATEUR PORTANT L'EPI TESTE..... <b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>	
FIGURE 4.9. : REPARTITION DES EPI CHEZ LES OPERATEURS EN ZONE MARAICHERE... <b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>	
FIGURE 4.10. : REPARTITION DES EPI CHEZ LES OPERATEURS EN ZONE COTONNIERE. <b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>	
FIGURE 4.11. : NIVEAUX DE PROTECTION EN ZONE MARAICHERE. .... <b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>	
FIGURE 4.12. : FREQUENCE DES TYPES D'IMPRUDENCE OBSERVES EN ZONE MARAICHERE. .... <b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>	
FIGURE 4.13. : FREQUENCE DES TYPES D'IMPRUDENCE OBSERVES EN ZONE COTONNIERE. .... <b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>	
FIGURE 4.14. : POSITIONS OBSERVEES CHEZ LES OPERATEURS PAR RAPPORT A LA DIRECTION DU VENT EN ZONE MARAICHERE..... <b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>	
FIGURE 5.1. : VUE SPATIALE DU TUNNEL AERODYNAMIQUE. .... <b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>	
FIGURE 5.2. : LES APPAREILS DE TRAITEMENT UTILISES POUR LES MESURES. <b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>	
FIGURE 5.3. : SCHEMA DETAILLE D'UN PULVERISATEUR A DOS A PRESSION ENTRETEENUE. .... <b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>	



FIGURE 5.4. : SCHEMA DETAILLE DE LA CANNE A PULVERISATION CENTRIFUGE. .... **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

FIGURE 5.5. : PATCHS SUR SUPPORT.....**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

FIGURE 5.6. : PATCHS COLLES AUX DIFFERENTS ENDROITS DU CORPS DE L'OPERATEUR.  
.....**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

FIGURE 5.7. : TUNNEL DE MESURES POUR ESSAIS SUR 2 RANGEES DE PAVES AUX POSITIONS DOS, LATERALE ET FACE A LA DIRECTION DU VENT.....**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

FIGURE 5.8. : CORDE DE REGLAGE DE LA HAUTEUR DE PULVERISATION DANS LE TUNNEL.  
.....**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

FIGURE 5.9. : TUNNEL DE MESURES POUR ESSAIS SUR 2 RANGEES DE PAVES. **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

FIGURE 5.10. : TUNNEL DE MESURE AVEC PRESENCE D'UNE VEGETATION ARTIFICIELLE.  
.....**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

FIGURE 5.11. : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU SPECTROPHOTOMETRE ET LONGUEURS D'ONDES D'EXCITATION ET D'EMISSION DE LA FLUORESCEINE.....**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

FIGURE 5.12. : DROITES DE CALIBRATION DU SPECTROFLUOROPHOTOMETRE SUR LA PLAGE DE 0 A 2 $\mu$ G/ML.....**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

FIGURE 5.13. : REPARTITION DE LA FLUORESCEINE SUR TIBIAS EN PULVERISATION A DOS AVEC TRAITEMENT SANS VEGETATION. ....**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

FIGURE 5.14. : REPARTITION DE LA FLUORESCEINE SUR TIBIA EN PULVERISATION A DOS SUR DE LA VEGETATION.....**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

FIGURE 5.15. : REPARTITION DE LA FLUORESCEINE SUR LES PARTIES CORPORELLES EN PULVERISATION A LA CANNE CENTRIFUGE. ....**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

FIGURE 5. 16. : COMPARAISON DE LA REPARTITION DE LA FLUORESCEINE SUR LES PARTIES CORPORELLES EN PULVERISATION A DOS AVEC ET SANS VEGETATION.**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

FIGURE 5.17. : REPARTITION DE LA FLUORESCEINE SUR LES TIBIAS EN PULVERISATION A DOS AVEC ET SANS VEGETATION.....**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

FIGURE 5.18. : COMPARAISON DE LA REPARTITION DE LA FLUORESCEINE SUR LES PARTIES CORPORELLES OBTENUE AVEC LES TRAITEMENTS AU PULVERISATEUR A DOS ET A LA CANNE CENTRIFUGE.....**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

FIGURE 6.1. : DOSES TOTALES CALCULEES PAR LES MODELES D'ESTIMATION EUROPEENS POUR LES FORMULATIONS LIQUIDE ET SOLIDE EN APPLICATION MANUELLE. .... **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

FIGURE 6.2. : POURCENTAGE DE VARIATION DE LA « DOSE ABSORBEE » POUR UNE FORMULATION LIQUIDE EN FONCTION DE DIFFERENTES ENTREES DES MODELES EUROPEENS.....**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

FIGURE 6.3. : POURCENTAGE DE VARIATION DE LA « DOSE ABSORBEE » POUR UNE FORMULATION SOLIDE EN FONCTION DE DIFFERENTES ENTREES DES MODELES EUROPEENS.....**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

FIGURE 6.4. : DIAGRAMME DE DISPERSION DES DOSES ABSORBEES OBTENUES AVEC LE MODELE SENEGALAIS (Y) EN FONCTION DES DOSES ABSORBEES OBTENUES AVEC LE MODELE ALLEMAND MOYENNE GEOMETRIQUE (X) EN MG S.A./ (PERSONNE X JOUR) ; A : PULVERISATION A DOS SANS EPI ; B : PULVERISATION A DOS EN PRESENCE D'EPI ; C : CANNE A PULVERISATION CENTRIFUGE SANS EPI ; D : CANNE A PULVERISATION CENTRIFUGE EN PRESENCE D' EPI. ....**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

FIGURE 6.5. : DIAGRAMME DE DISPERSION DES DOSES ABSORBEES OBTENUES AVEC LE MODELE SENEGALAIS (Y) EN FONCTION DES DOSES ABSORBEES OBTENUES AVEC LE MODELE ALLEMAND 75<sup>EME</sup> PERCENTILE (X) EN MG S.A./ (PERSONNE X JOUR) ; A : PULVERISATION A DOS SANS EPI ; B : PULVERISATION A DOS EN PRESENCE D'EPI; C : CANNE A PULVERISATION CENTRIFUGE SANS EPI ; D : CANNE A PULVERISATION CENTRIFUGE EN PRESENCE D'EPI. ....**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

FIGURE 6.6. : DIAGRAMME DE DISPERSION DES DOSES ABSORBEES OBTENUES AVEC LE MODELE SENEGALAIS (Y) EN FONCTION DES DOSES ABSORBEES OBTENUES AVEC LE MODELE BRITANNIQUE (X) EN MG S.A./ (PERSONNE X JOUR) ; A : PULVERISATION A DOS SANS EPI ; B : PULVERISATION A DOS EN PRESENCE D'EPI ; C : CANNE A PULVERISATION CENTRIFUGE SANS EPI ; D : CANNE A PULVERISATION CENTRIFUGE EN PRESENCE D'EPI. ....**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

FIGURE 6.7. : DIAGRAMME DE DISPERSION DES DOSES ABSORBEES OBTENUES AVEC LE MODELE SENEGALAIS (Y) EN FONCTION DES DOSES ABSORBEES OBTENUES AVEC LE MODELE HOLLANDAIS (X) EN MG S.A./ (PERSONNE X JOUR) ; A : PULVERISATION A DOS SANS EPI ; B : CANNE A PULVERISATION CENTRIFUGE SANS EPI. ...**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

## SIGNIFICATION DES PRINCIPAUX SIGLES

<b>ACP</b>	Afrique Caraïbe Pacifique (ou groupe des états ACP)
<b>ADI</b>	Acceptable Daily Intake (ou Dose Journalière Acceptable)
<b>ANCAR</b>	Agence Nationale de Conseil Agricole et Rural
<b>AOEL</b>	Acceptable Operator Exposure Level
<b>APV</b>	Autorisation Provisoire de Vente
<b>BCPC</b>	British Crop Protection Council
<b>CEE</b>	Communauté Economique Européenne
<b>CEDEAO</b>	Communauté Economique des Etats de l'Afrique de l'Ouest
<b>CILSS</b>	Comité International de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel
<b>CNGPCD</b>	Comité National de Gestion des Produits Chimiques Dangereux
<b>CSP</b>	Comité Sahélien des Pesticides
<b>DFR</b>	Résidu Foliaire Délogeable
<b>DJA</b>	Dose Journalière Acceptable
<b>DL<sub>50</sub></b>	Dose Létale 50
<b>DNC</b>	Délai Nécessaire à Concevoir
<b>DPV</b>	Direction de la Protection des Végétaux
<b>DPS</b>	Direction de la Prévision et de la Statistique
<b>DSE</b>	Dose Sans Effet (ou NOEL)
<b>EC</b>	Concentré émulsionnable
<b>EPA</b>	Environmental Protection Agency
<b>FAO</b>	Food and Agriculture Organization of the United Nations
<b>ISRA</b>	Institut Sénégalais de Recherches Agricoles
<b>LAI</b>	Leaf Area Index
<b>LMR</b>	Limite Maximale en Résidu
<b>LOAEL</b>	Lowest Observed Adverse Effect level
<b>LOQ</b>	Limite Objective de Quantification
<b>MDRGF</b>	Mouvement pour les Droits et le Respect des Générations futures
<b>MEF</b>	Ministère de l'Economie et des Finances
<b>NOAEL</b>	No Observed Adverse Effect Level
<b>NOEL</b>	No Observed Effect Level (ou DSE)
<b>OCDE</b>	Organization for Economic Cooperation and Development
<b>OMC</b>	Organisation Mondiale du Commerce
<b>OMS</b>	Organisation Mondiale de la Santé
<b>ONGs</b>	Organisations non Gouvernementales
<b>PAEP</b>	Projet d'Appui à l'Entreprenariat Paysan de la région des Niayes

<b>PAN</b>	Pesticide Action Network
<b>PDMAS</b>	Programme de Développement des Marchés Agricoles du Sénégal
<b>PIC</b>	Procédure d'Information et de Consentement Préalable
<b>PIE</b>	Exposition Inhalatoire Potentielle
<b>PIP</b>	Programme Initiative Pesticide (du COLEACP)
<b>PLCP</b>	Projet de Lutte Contre la Pauvreté
<b>PMIA</b>	Projet de Modernisation et d'Intensification Agricole
<b>PPEA</b>	Projet de Promotion des Exportations Horticoles
<b>PPMEH</b>	Projet de Promotion de Petites et Moyennes Exploitations Horticoles
<b>POP</b>	Polluants Organiques Persistants
<b>PNUE</b>	Programme des Nations-Unies pour l'Environnement
<b>RNA</b>	Recensement National de l'Agriculture
<b>SC</b>	Suspension Concentrée
<b>SENCHEM</b>	Sénégalaise Chimique (Filiale du groupe Industrie Chimique du Sénégal)
<b>SL</b>	Suspension Liquide
<b>SOCHIM</b>	Société Chimique
<b>SODEFITEX</b>	Société des Fibres Textiles
<b>SPIA</b>	Société de Produits Industriels et Agricoles
<b>SPC</b>	Prélèvement Communautaire de Solidarité
<b>TBV</b>	Très Bas Volume
<b>UE</b>	Union Européenne
<b>UEMOA</b>	Union Economique et Monétaire de l'Afrique de l'Ouest
<b>ULV</b>	Ultra Bas Volume
<b>VMD</b>	Diamètre Volumétrique Médian
<b>WP</b>	Wettable Powder ou Poudre mouillable
<b>WG</b>	Wettable Granulate ou Granulés dispersables

## CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

Dans le monde entier, la lutte chimique au moyen de pesticides reste le moyen le plus utilisé pour protéger les cultures, les semences et les denrées stockées contre les phytoparasites. La lutte chimique permet de limiter les pertes des cultures en protégeant les végétaux des organismes nuisibles, en réduisant les attaques des ravageurs, en limitant la concurrence des plantes adventices et en assurant la conservation des denrées stockées.

On peut définir un *pesticide* comme une substance ou une préparation utilisée pour lutter contre des êtres vivants nuisibles à l'homme de façon directe ou indirecte. Selon la nature des nuisibles auxquels ils sont destinés, les pesticides sont appelés insecticides, acaricides, nématicides, fongicides, rodenticides ou herbicides.

Ces dernières années, le marché mondial des pesticides s'est élevé à plus de 30 milliards de dollars US par an, la part des pays en développement dans le marché mondial représentant 3 milliards de dollars US. L'utilisation des pesticides suscite de nombreuses controverses en raison des risques qu'ils peuvent occasionner à l'environnement et à la santé des individus.

Pour lutter contre les effets néfastes occasionnés à l'environnement, depuis une vingtaine d'année, les organismes responsables de la recherche agronomique de la plupart des pays préconisent le recours à la lutte intégrée. Celle-ci consiste à combiner un emploi judicieux des pesticides, permettant de limiter les effets néfastes et non désirés de ces substances, avec le recours aux moyens de la lutte culturale, des ressources génétiques et de l'usage de la lutte biologique contre les ravageurs.

En ce qui concerne la santé des individus, les études toxicologiques montrent que l'emploi des pesticides comporte des risques de nocivité pour les manipulateurs chargés de leur application et, par la suite de leur persistance sous forme de résidus, pour les consommateurs des produits végétaux traités. Partout dans le monde, des cas d'intoxications aiguës ainsi que des effets chroniques dus à l'absorption répétée de faibles quantités dans le temps sont observés. Même si l'apparition des symptômes se fait tardivement, des études ont montré que les produits phytosanitaires sont à l'origine de certaines pathologies comme les

troubles neurologiques [Glynn, 2006 ; Feng *et al.*, 2006], des leucémies, des troubles de reproduction [De Cock *et al.*, 1995 ; Rangoonwala *et al.*, 2005 ; Rahimi *et al.*, 2007 ; Cohn *et al.*, 1978 ; Ning *et al.*, 2007].

Dans les différents pays de l'Union Européenne, des mesures de protection harmonisées sont en vigueur et la vente d'un pesticide doit être autorisée par des organismes officiels. C'est dans ce contexte que sont élaborées des législations concernant l'homologation des pesticides qui visent à assurer que la mise sur le marché d'une préparation contenant une ou plusieurs substances actives ne présente pas de risques inacceptables pour l'applicateur, le consommateur et l'environnement. Ainsi, avant d'autoriser l'emploi d'un nouveau produit, des études complètes sont exigées, comportant notamment un dossier toxicologique et l'évaluation du risque lié à l'exposition. En complément aux études toxicologiques, dont la réalisation est complexe et le coût très élevé, les experts scientifiques européens ont mis au point des modèles de calcul permettant une estimation rapide de l'exposition.

Une telle approche n'a pas encore été développée dans les pays en développement, alors que, dans ces pays, l'utilisation de pesticides engendre les risques les plus importants à la fois pour la santé humaine et pour l'environnement. C'est ainsi que l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) dénombre chaque année 3 millions de cas d'empoisonnement par les pesticides et 20 000 décès non intentionnels, se situant principalement dans les pays en développement [PAN AFRICA, 2003]. De manière synthétique, on peut signaler que les pays en développement utilisent 20 % des pesticides mais totalisent 99 % des cas d'empoisonnement.

Le Sénégal peut être considéré comme un exemple des pays du Sahel où les pratiques phytosanitaires sont quasi identiques. Le Sénégal joue également un rôle important dans les transactions de produits chimiques du fait de son ouverture à l'Océan Atlantique. Des quantités importantes de pesticides y sont utilisées, surtout en maraîchage et en culture cotonnière. Les quantités utilisées sont estimées à 1 336 560 litres de liquides et 598 tonnes de solides [PAN AFRICA, 2003]. Selon cette même source, plus de 500 cas d'intoxication sont répertoriés. Des enquêtes ont montré que les applicateurs travaillent souvent sans aucune protection, ce qui les expose particulièrement vis-à-vis des produits qu'ils utilisent.

Les objectifs de cette étude sont donc d'apporter des solutions permettant de réduire les risques d'exposition auxquels sont confrontés les applicateurs à partir des facteurs de risque liés à la pulvérisation au Sénégal. Pour ce faire, d'une part des enquêtes ont été menées sur le terrain, d'autre part des essais ont été réalisés en conditions contrôlées, afin de caractériser les pratiques des opérateurs et d'identifier les facteurs de risque. Une analyse du risque d'exposition est menée sur base des observations, et enfin un modèle de calcul permettant d'estimer rapidement l'exposition des opérateurs du Sénégal est proposé à la discussion.

Cette étude comprend donc les chapitres suivants :

- ❖ la partie bibliographique ;
- ❖ l'application des produits phytosanitaires au Sénégal ;
- ❖ l'analyse des conditions d'applications des pesticides au Sénégal ;
- ❖ les essais d'exposition en tunnel aérodynamique ;
- ❖ les bases d'un modèle de calcul d'exposition ;
- ❖ la conclusion.

## CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

### 2.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, après avoir rappelé quelques généralités concernant les produits phytosanitaires, le phénomène de dérive est abordé, en tant que source de contamination des opérateurs. Les risques créés par les produits phytosanitaires et les méthodes d'évaluation du risque sont abordés.

### 2.2 GENERALITES SUR LES PRODUITS PHYTOSANITAIRES

#### 2.2.1 Définition

La Directive européenne 91/414/CEE du Conseil du 15 juillet 1991 définit les *produits phytopharmaceutiques* comme étant des substances actives et des préparations contenant une ou plusieurs substances actives qui sont présentées sous forme dans laquelle elles sont livrées à l'utilisateur et qui sont destinées à :

- protéger les végétaux ou les produits végétaux contre tous les organismes nuisibles et à prévenir l'action de ces derniers (insecticides, fongicides, herbicides, algicides, nématicides, acaricides, molluscides, bactéricides, rodenticides, etc.) ;
- exercer une action sur les processus vitaux des végétaux, pour autant qu'il ne s'agisse pas de substances nutritives (par exemple, les régulateurs de croissance) ;
- assurer la conservation des produits végétaux, pour autant que ces substances ou produits ne fassent pas l'objet de dispositions particulières du Conseil ou de la Commission concernant les agents conservateurs ;
- détruire les végétaux indésirables ou les parties des végétaux, freiner ou prévenir une croissance indésirable des végétaux.

On peut ajouter que les pesticides qui sont employés pour des usages non agricoles tombent dans la catégorie des « biocides » et font l'objet d'une réglementation spécifique.



## 2.2.1 Composition des produits phytosanitaires

Sauf cas exceptionnel, les substances actives ne sont pas utilisées telles quelles mais elles sont « formulées », c'est-à-dire qu'elles sont présentées sous diverses formes qui permettent un emploi aisé et le plus sûr possible pour l'agriculteur tout en garantissant une bonne efficacité. Le produit commercial est donc un mélange de plusieurs composants : il contient la substance active associée à divers co-formulants. Ces « co-formulants » ou « adjuvants » entrent dans la composition de la formulation et sont classés selon leur fonction: agent antimoissant, antigel, liant, tampon, répulsif, conservateur, agent odorant,...). Les formulations sont soit liquides (ex : *solution dans l'eau* (SL) ou *concentré émulsionnable* (EC), ou *suspension concentrée* (SC) ou solides (*exemple : en poudre mouillable* (WP) ou *en granulés dispersables* (WG)).

Un *adjuvant* utilisé lors de la pulvérisation est une substance qui, en principe, n'a pas d'activité biologique propre mais qui peut améliorer l'action des substances actives contenues dans les produits commerciaux [Gauvrit *et al.*, 1995]. Quant ils sont mélangés directement dans la cuve du pulvérisateur juste avant la pulvérisation, ils sont qualifiés *d'adjuvants extemporanés*. Dans cette dernière catégorie, on trouve notamment des additifs (dont les huiles), des mouillants et des humectants [Gauvrit 1995-1 & 1995-2].

1. *Les additifs* : sont le plus souvent ajoutés à la bouillie pour améliorer la rétention de celle-ci sur les feuilles. Parmi eux, les huiles d'origine minérale ou végétale facilitent la pénétration foliaire de la matière active lipophile mais leur mode d'interaction avec la cuticule est encore sujet à discussion entre les auteurs. Les huiles ont la particularité d'empêcher la cristallisation de certains herbicides et, de ce fait, en facilitent la pénétration. Selon Gauvrit [1994], l'adjonction d'huile à une bouillie réduit la vitesse d'évaporation des gouttes durant leur vol. Les huiles végétales sont de plus en plus prisées car elles présentent les avantages d'être biodégradables, issues de ressources renouvelables et peuvent être produites par l'agriculture elle-même.

2. *Les mouillants* : il s'agit de molécules bipolaires qui diminuent la tension de surface des bouillies. Cette propriété est recherchée pour augmenter l'efficacité d'un traitement en permettant un meilleur étalement des gouttes sur des surfaces peu mouillables, comme le sont les feuilles de graminées. Par contre, l'efficacité

de la bouillie sur une cible facilement mouillable peut se trouver réduite suite à un ruissellement excessif de la goutte sur la feuille.

3. *Les humectants* : cette catégorie d'adjuvant a la particularité de ralentir la dessiccation des gouttelettes et maintient de ce fait la matière active hydrosoluble dans les meilleures conditions pour pénétrer dans la cible.

## **2.3 LA DERIVE DES PRODUITS PHYTOSANITAIRES**

Pendant la pulvérisation, une partie des produits phytosanitaires appliqués n'atteint pas la cible. En particulier, la dérive a des conséquences préoccupantes en raison des effets négatifs sur l'environnement et d'autre part sur les opérateurs. En effet, le spectre des fines gouttes en brumisation dans l'air risque d'être soit inhalé par ces derniers, soit absorbé au niveau dermique.

### **2.3.1 Définition de la dérive**

La dérive est considérée comme l'effet secondaire le plus important de la pulvérisation. Elle peut être définie comme la quantité de produit pulvérisé qui, déplacée par les courants d'air, retombe sur le sol ou s'évapore après avoir parcouru une distance plus ou moins longue. Elle se produit donc au moment même de l'application ou peu de temps après. Elle donne lieu à une pollution du sol, des eaux et de l'atmosphère et à une contamination des opérateurs [Bélamie *et al.*, 1997 ; Koch *et al.*, 2003].

### **2.3.2 Facteurs influençant la dérive**

Les facteurs influençant la dérive sont nombreux et dépendent de paramètres physiques, chimiques ou climatiques et de l'interaction entre ces paramètres.

La taille des gouttes : les gouttes issues d'une buse de pulvérisation ont une taille et une vitesse variable. La taille des gouttelettes, mesurée en micromètres, est souvent caractérisée par le *diamètre volumétrique médian* (VMD). Le VMD est une valeur statistique qui définit un diamètre médian de gouttelettes, c'est-à-dire le diamètre de la goutte pour laquelle 50 % du

volume du jet de pulvérisation est constitué de gouttelettes plus grosses et 50 % du volume est constitué par des gouttelettes plus fines. Le BCPC (British Crop Protection Council) a défini cinq catégories de jets de pulvérisation d'après le VMD : jet très fin ( $VMD < 90 \mu\text{m}$ ), jet fin ( $90 \mu\text{m} < VMD < 200 \mu\text{m}$ ), jet moyen ( $200 \mu\text{m} < VMD < 300 \mu\text{m}$ ), jet à grosses gouttes ( $300 \mu\text{m} < VMD < 450 \mu\text{m}$ ), jet à très grosses gouttes ( $450 \mu\text{m} < VMD$ ).

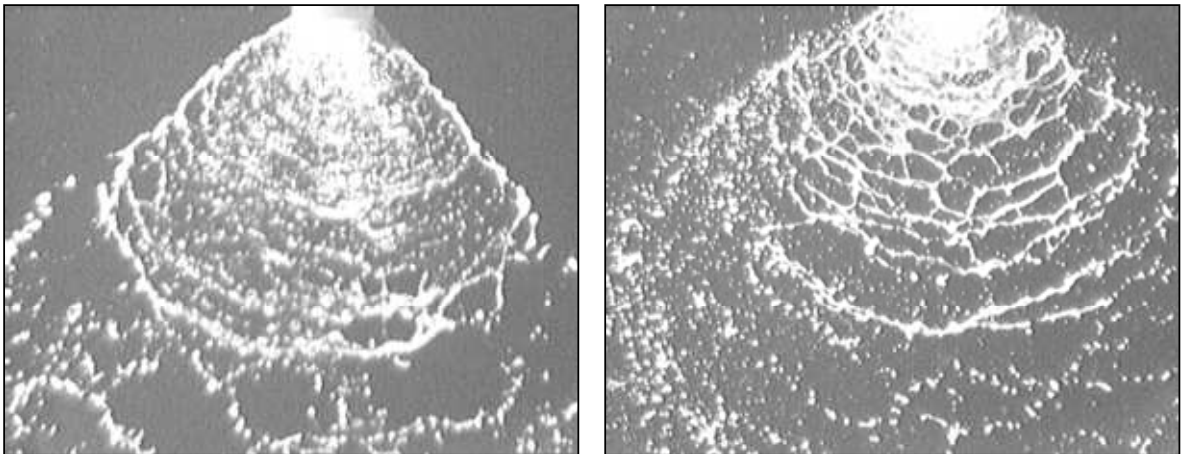


Figure 2.1. : Formation des gouttes de pulvérisation à la sortie d'une buse de pulvérisation. A gauche, pulvérisation d'eau; à droite, pulvérisation de LI-700 (buse antidérive,  $p=3$  bars) [Stainier., 2004].

La taille des gouttes est un élément essentiel dans la dérive. Les grosses gouttes soumises aux lois de la balistique tombent par gravité, tandis que les fines gouttes ont tendance à rester en suspension dans l'air et à subir l'effet des conditions atmosphériques (transport et/ou évaporation). Plusieurs auteurs ont montré une réduction significative de la dérive pour des gouttelettes de diamètre supérieur à  $150 \mu\text{m}$  [Matthews, 1992 ; Miller *et al.*, 2000]. Selon Ozkan [1991], une goutte de  $100 \mu\text{m}$  lâchée d'une hauteur de 3 m avec un vent latéral de 5 km/h se déportera de 15 m, tandis qu'une goutte de  $20 \mu\text{m}$  dans des conditions identiques peut dériver de 304 m avant d'atteindre le sol. D'où l'importance d'une étude de la granulométrie des gouttes pour aborder la problématique de la dérive.

Pression : dans une buse de pulvérisation, il existe une relation de base reliant la pression au débit :

$$q = m s \sqrt{\frac{2p}{\rho}}$$

$q$  = débit de pulvérisation d'une buse ( $m^3/s$ ) ;  
 $s$  = section de l'orifice ( $m^2$ ) ;  
 $p$  = pression à l'amont de l'orifice de la buse (Pa) ;  
 $\rho$  = masse volumique du liquide ( $kg/m^3$ ) ;  
 $m$  = coefficient du débit pour un type de buse donné.

Pour une buse donnée, si une augmentation de pression entraîne une modification de débit, elle génère également une diminution de la granulométrie et, par conséquent, une plus forte sensibilité à la dérive.

Hauteur de pulvérisation : ce paramètre influence le temps de chute. Au plus la hauteur est importante, au plus la goutte peut subir l'effet des conditions climatiques. En particulier, si l'humidité relative est faible, le diamètre de base de la goutte est susceptible de se réduire et elle devient plus sensible à la dérive.

Formulation chimique : à côté de l'activité biologique, de l'efficacité et de la sélectivité qui résultent de la nature de la matière active et des adjuvants de formulation, il faut s'intéresser aux interactions des propriétés physico-chimiques de la bouillie qui déterminent la persistance, la mobilité, la biodisponibilité [Schiffers *et al.*, 1991 & 1992]. Les propriétés physico-chimiques de la bouillie influencent la taille des gouttes et donc la dérive [Stainier *et al.*, 2004]. Ainsi, dans le cas d'application de fines gouttes, l'emploi d'un liquide peu volatil est recommandé pour éviter la diminution de la taille des gouttes, voire la formation d'aérosol qui présente un potentiel de pollution important.

Les conditions météorologiques : selon Siebers *et al.* [2003], les conditions atmosphériques ont une influence importante sur la dérive. La gouttelette une fois formée est soumise aux paramètres atmosphériques, à savoir le vent, la température et l'humidité qui ont tendance à affecter sa trajectoire et/ou sa durée de vie. Le vent agit sur la direction et la trajectoire des gouttes. En l'absence de vent, une goutte lâchée sans vitesse initiale a tendance, sous l'effet de la gravité et de la poussée aérodynamique, à descendre à une vitesse constante. Cette vitesse est décrite par la loi de Stokes :

$$v = \frac{g d^2 \rho_d}{18\eta}$$

- v : vitesse constante à l'équilibre (m/s) ;  
d : diamètre de la gouttelette (m) ;  
g : accélération de la pesanteur (m/s<sup>2</sup>) ;  
ρ<sub>d</sub> : masse volumique de la gouttelette (kg/m<sup>3</sup>) ;  
η : viscosité de l'air (Ns/m<sup>2</sup>).

D'après la loi de Stokes, les gouttelettes de faible diamètre sont plus exposées aux mouvements de l'air qui ralentissent leur chute, les déportent horizontalement et, par conséquent, les exposent davantage à la dérive. Cette dérive atteint son maximum pour des vitesses de vent élevées. Selon Thornhill et Matthews [1999], à partir d'une certaine vitesse de vent (supérieure à 5 m/s), il est conseillé d'arrêter complètement le traitement. La direction, quant à elle, est à prendre en compte afin d'éviter surtout la contamination des zones sensibles et de l'opérateur. Ces paramètres étant très variables sur le terrain, Thistle *et al.* [1998] recommandent de réaliser des mesures durant une dizaine de minutes pour déterminer la direction moyenne de la vitesse du vent.

La température et l'humidité atmosphérique interviennent dans le processus d'évaporation et par conséquent sur la durée de vie de la goutte. Cette durée de vie est fonction de son diamètre initial et de la température du milieu selon la relation suivante [Matthews, 1992] :

$$t = \frac{d^2}{80. \Delta T}$$

- d : diamètre moyen la gouttelette en (μm) ;  
ΔT : la différence de température en °C entre les thermomètres sec et humide.

Pour que la gouttelette puisse atteindre la cible, sa durée de vie doit être supérieure à son temps de chute. La prise en compte de cette donnée par l'opérateur est importante quant au choix des conditions adéquates pour pulvériser la bouillie.

La culture : elle est la cible de la pulvérisation. Elle constitue également un obstacle biologique à la dérive [Siebers *et al.*, 2003]. Par ailleurs, le microclimat généré au voisinage du feuillage pourrait constituer une source de réduction de contamination des zones sensibles (ruisseaux, voisinage, etc.).

### **2.3.3 Quantification de la dérive**

La mesure de la dérive peut se faire soit au champ, soit en conditions contrôlées. Cette deuxième possibilité offre la possibilité de recréer de manière reproductible les conditions atmosphériques et les conditions de pulvérisation rencontrées sur le terrain lors de l'application des produits phytosanitaires. Toutefois, la longueur de mesure des dépôts est limitée, ce qui n'est pas le cas lors des mesures au champ.

Quant aux mesures de terrain, elles présentent l'avantage d'inclure à la fois les effets liés aux déplacements du tracteur ou de l'opérateur, les oscillations de la rampe liées aux irrégularités du sol, les turbulences liées à la végétation, ... Cependant, l'inconvénient majeur de cette méthode est la non-reproductibilité des paramètres liés à la variabilité élevée des conditions atmosphériques.

Ces deux méthodes s'avèrent coûteuses et le temps consacré pour leur réalisation est fastidieux, ce qui a poussé certains auteurs à recourir à la modélisation par l'outil informatique.

#### **2.3.3.1 Mesure de la dérive en milieu contrôlé**

Plusieurs méthodes ont été proposées pour quantifier la dérive de pulvérisation en milieu contrôlé.

Méthode biologique : elle est basée sur le suivi de la nécrose causée par l'effet phytotoxique de la matière active sur certaines plantes. Cette méthode donne des renseignements sur les dégâts occasionnés par la dérive et sur les distances auxquelles ses effets se font sentir. Néanmoins, elle s'avère assez coûteuse et ne permet pas de préciser les caractéristiques exactes des gouttelettes dérivées.

Méthode par analyse chimique : elle consiste à faire circuler un courant d'air à travers un absorbant. Le pesticide est extrait puis analysé par Gas Chromatography/Mass Spectrophotometry (GC/MS). Cette méthode permet de quantifier la concentration en polluants dans l'air durant et après les applications [Miller *et al.*, 2000 ; Siebers *et al.*, 2003].

Mesure par colorimétrie ou fluorimétrie : un traceur coloré ou fluorescent à concentration connue est mélangé à la bouillie pulvérisée pour ensuite être collecté sur un support inerte (boîte de pétri, lame de verre, tissu, papier filtre). Ce support est par la suite lavé par un solvant et le traceur récolté est quantifié. C'est une méthode facile à mettre en œuvre. Plusieurs études ont fait usage de divers traceurs comme éléments de quantification. Yates *et al.* [1976] ont utilisé le sulfate de manganèse et le chlorite de strontium. Salyani *et al.* [1988] ont utilisé l'hydroxyde de cuivre. Un nombre grandissant d'auteurs font usage d'un traceur fluorescent comme la fluorescéine [Miller *et al.*, 1989 ; Zhang *et al.*, 1996 ; Siati, 2005 ; Koch *et al.*, 2003 ; Stainier, 2004]. Le principal inconvénient de la fluorescéine est sa dégradation sous l'effet de la lumière solaire [Gil *et al.*, 2005]. Par conséquent, Cai et Stark [1997] trouvent plus intéressant d'utiliser le sulfoflavine comme traceur : il a un taux de dégradation de 11 % après 8 heures d'exposition au soleil. D'autres auteurs se sont basés sur la bioluminescence de la matière étudiée [Miao *et al.*, 2006 ; Kumar S.H.M *et al.*, 2006].

Mesure par pesage : la dérive est obtenue par la différence entre le poids des bouillies collectées sous la buse en l'absence de vent par rapport à celui obtenu avec un vent déterminé. L'inconvénient est l'impossibilité d'estimer la portée de la dérive.

Mesure par Laser ou Laser Doppler Velocimer (LDV system) : elle se base sur la quantification du nombre de gouttes traversant une section de mesure d'un tunnel donné. Elle se fait à l'aide d'un granulomètre laser de type PDPA ou Malvern dont le laser traverse la section de test. Cette méthode a les avantages d'offrir les informations sur le nombre de gouttes à une distance donnée, le volume et la granulométrie de ces gouttes et la possibilité de scanner le tunnel tranche par tranche.

Mesure à l'aide d'un banc de répartition : ces bancs sont constitués des gouttières standardisées de 50 mm de largeur, parallèles à la direction d'avancement et qui dirigent la partie du jet collectée vers des éprouvettes graduées. On mesure le débit de liquide collecté en fonction de la distance à la buse une fois le régime d'écoulement établi.

### 2.3.3.2 Mesure de la dérive sur le terrain

Sur le terrain, les conditions atmosphériques ne sont pas contrôlables et, lors de la pulvérisation, les gouttes emportées par le vent subissent concomitamment l'effet des autres paramètres (température et hygrométrie).

Collecteurs utilisés : la mesure de la dérive sur le terrain utilise le même type de collecteurs que ceux utilisés en tunnel. Les gouttelettes sont collectées sur des supports qui sont de type biologique, de type traceur mixte, c'est-à-dire on utilise un traceur fluorescent et un collecteur végétal. Hardi [2004] a mis au point un protocole sur une jachère dont la végétation possède une hauteur de 10 à 15 cm. Les mesures sont effectuées sur une ligne perpendiculaire au trajet de la rampe de pulvérisation et parallèlement à la direction du vent. La fluorescéine est utilisée comme traceur. Les collecteurs fixes sont installés au sol en dessous du trajet de la rampe, dans l'alignement de la ligne de mesure ; d'autres sont placés sur la ligne de mesure, 3 par position, à des distances de 1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 7,5 ; 10 ; 15 ; 30 et 50 m depuis l'extrémité de la rampe. Dans ce même protocole, la collecte des dépôts aériens se fait par des échantillonneurs iso-cinétiques. Le principe de ces appareils de mesure est de collecter la matière en suspension dans l'air en l'aspirant à débit constant. Il consiste en un tube contenant des filtres et un ventilateur axial. Ces appareils sont montés sur un mât de 6 m et placés à des hauteurs de 0,5 ; 1 ; 2 ; 4 et 6 m. Chez Stainier *et al.* [2006], les espacements entre les collecteurs sont de 50 cm pour les 3 premiers mètres, 1 m pour les distances de 3 à 10 m et 5 m pour les distances allant de 10 à 50 m de l'extrémité de la rampe du pulvérisateur.

Mesures météorologiques : l'équipement pour l'enregistrement des données météorologiques est monté sur un ou plusieurs mâts [Hardi, 2004 ; Stainier *et al.*, 2006]. La température et l'humidité relative sont mesurées à une hauteur de 2 m. Les mesures de vent sont prises à deux hauteurs différentes afin de dresser le profil logarithmique du vent au moment de l'essai. Si possible, la pression barométrique est obtenue par une station météorologique proche. La couverture nuageuse est estimée.

Procédure de pulvérisation : les paramètres liés à la pulvérisation (vitesse d'avancement du tracteur, pression de travail, débit) sont maintenus constants. Des paramètres comme la hauteur de la rampe, les écartements entre buses peuvent être variables suivant les caractéristiques de la culture et des appareils utilisés. Pour chaque test, les données suivantes



doivent être enregistrées : le type de pulvérisateur, le type de buse, la longueur de la rampe, sa hauteur, le nombre de buses et leur écartement, les caractéristiques physico-chimiques de la bouillie, le type de surface, les conditions de végétation ainsi que le volume pulvérisé. Pour tenir compte de la variabilité des conditions opératoires, on effectue plusieurs répétitions des essais. A la fin du test, les collecteurs sont immédiatement ramassés et conservés dans le noir jusqu'au traitement.

### **2.3.4 Modélisation de la dérive**

Comme on le voit, les méthodes utilisées pour quantifier la dérive des gouttelettes de pulvérisation sont lourdes à mettre en œuvre et coûteuses. Des modèles permettant de prédire ces caractéristiques, ou du moins, une partie d'entre elles sont utilisés et cités par Stainier [2004].

#### Les modèles Random-walk ou de type Markovien

Il s'agit de logiciels de modélisation de la dérive selon une approche qualifiée de Random-walk. Ils décrivent la trajectoire individuelle des gouttelettes produites par une buse pour prédire la dérive sous le vent selon le principe suivant : chaque gouttelette qui quitte la buse est animée d'une vitesse initiale et d'une direction choisie respectivement en fonction de la pression de pulvérisation et de la distribution angulaire du jet. Les forces qui agissent sur la particule liquide sont la constante d'attraction universelle de la pesanteur et la force de frottement de l'air qui varie en fonction de la vitesse de la gouttelette. A partir de ces paramètres, la trajectoire est calculée en intégrant les équations de la seconde loi de Newton.

#### Les modèles CFD (Computational Fluid Dynamics)

Il s'agit des logiciels de mécanique des fluides, tels que Fluent, qui sont utilisés pour modéliser la dérive en conditions contrôlées. Ces modèles sont basés sur des équations théoriques telles que les équations de Navier et Stokes. Ce type d'approche présente l'avantage par rapport aux modèles de type Random-Walk, d'intégrer les derniers développements en mécanique des fluides pour le calcul numérique de la trajectoire des gouttelettes. Ils sont très commodes pour étudier l'influence de variables telles que le vent,

l'humidité relative, la vitesse initiale des gouttelettes, la hauteur de pulvérisation, la turbulence atmosphérique, la volatilité sur la dérive.

#### Les modèles Gaussiens (dispersion model ou plume model)

Ils reposent sur l'hypothèse selon laquelle la direction du vent détermine la ligne centrale du panache qui s'échappe de la source. Perpendiculairement au vent, la distribution présente une forme gaussienne dont l'amplitude croît linéairement avec la distance sous le vent. Il en résulte que la concentration est maximale dans l'air près de la source et décroît progressivement. Les modèles gaussiens sont réputés robustes dans l'application de dispersion. Les paramètres de ce type de modèle sont le débit de la buse, la vitesse moyenne du vent, des paramètres de dispersion, une hauteur d'émission et la vitesse de sédimentation des gouttelettes.

#### Les modèles statistiques

Ces modèles basés sur des régressions multiples permettent d'étudier l'effet des variables indépendantes sur les dépôts. Les variables peuvent être par exemple, la distance, la vitesse du vent, la hauteur de pulvérisation, le Diamètre Volumétrique Médian, le pourcentage en volume de gouttelettes inférieur à un diamètre limite (par généralement 100  $\mu\text{m}$ ), la pression ou le débit de pulvérisation, la température, le type de buse.

## **2.4 LES RISQUES CREEES PAR LES PRODUITS PHYTOSANITAIRES**

### **2.4.1 Notions de base**

Le *risque* est défini comme un danger, un inconvénient, auquel il est plus ou moins probable d'être exposé. Dans ce travail où on s'intéresse aux pesticides, substances chimiques dont les propriétés toxicologiques intrinsèques les rendent dangereux non seulement pour la santé mais aussi pour l'environnement, le *risque* résulte du croisement entre l'exposition à ceux-ci et les effets toxiques de ceux-ci. L'évaluation du risque (*risk assessment*) est fonction de la toxicité de la substance et de l'exposition. Le processus de l'évaluation du risque comporte les étapes suivantes :

- l'identification du danger : origine et nature du danger lié à l'emploi d'une substance active (*hazard identification*) ;
- l'évaluation du danger (*hazard assessment*) qui prend en compte les propriétés toxicologiques intrinsèques de la substance évaluées par des études toxicologiques (toxicité aiguë et toxicité chronique avec mesure des effets mutagènes, cancérigènes, sur la reproduction,...), des études toxicodynamiques, des données épidémiologiques,... ;
- l'évaluation de l'exposition (*exposure assessment*) des applicateurs, des travailleurs et des *bystanders* ;
- la caractérisation du risque (*risk characterization*) qui permet d'évaluer l'ampleur du risque sur la santé des individus.

La pénétration des substances toxiques dans les organismes vivants peut se faire selon différentes modalités. Chez l'homme à côté de la *voie orale* (dite souvent digestive), les substances toxiques peuvent emprunter la *voie respiratoire* et la *voie dermique*. La voie respiratoire est à considérer non seulement dans le cas des substances toxiques sous forme de gaz ou de vapeurs, mais encore dans celui des substances liquides ou solides capables d'être dispersées sous forme de particules de taille suffisamment petite (aérosols) pour pouvoir pénétrer jusqu'aux alvéoles pulmonaires, traverser l'épithélium pulmonaire et gagner la circulation générale pour accéder aux organes essentiels. La pénétration par la peau et les muqueuses peut également revêtir une grande importance dans le cas, notamment, de substances susceptibles d'être solubilisées par les lipides cutanés.

Selon la Directive 91/414/CEE, la toxicologie fait référence d'une part à *la toxicité aiguë*, et d'autre part à *la toxicité à court terme* et à *la toxicité à long terme*, qui surviennent après des expositions répétées<sup>1</sup>. Les intoxications du premier type se manifestent rapidement après une exposition unique à une dose relativement importante. Les intoxications après expositions répétées surviennent après des absorptions longtemps répétées de petites doses. L'absorption de ces petites doses, qui, si elles s'éliminaient normalement, serait sans conséquences discernables, provoque, au bout d'un certain temps, des troubles comme une altération du fonctionnement de différents organes (foie, reins, centres nerveux, moelle osseuse, glandes endocrines), de l'aptitude à la reproduction, de la durée de vie, ... Un

---

<sup>1</sup> On donne en général aux formes d'intoxications à long terme le nom d' « intoxication chronique ». C'est une dénomination inexacte, car il n'est pas impossible qu'une lésion irréversible, et par conséquent chronique, puisse être la conséquence d'un phénomène initial de toxicité aiguë.

exemple bien connu est celui de l'insecticide D.D.T., dont la  $DL_{50}$  *per os* chez le rat se situe aux environs de 250 mg/kg de poids vif. Or, l'administration au même animal pendant sept ou huit mois d'un régime renfermant seulement 5 mg/kg de l'insecticide, soit une absorption journalière ne dépassant pas 0,1 mg, provoque l'apparition de lésions hépatiques. En-dehors des effets de toxicité aiguë et des effets de toxicité à plus ou moins long terme pouvant résulter de l'absorption répétée de petites doses, il existe des *effets également à plus ou moins long terme pouvant résulter de l'absorption d'une dose unique*. Un exemple de ce type de toxicité est fourni par un herbicide dérivé du bipyridinium qui, plusieurs semaines après l'ingestion d'une certaine dose n'ayant entraîné que des troubles gastro-intestinaux mineurs, provoque une prolifération des cellules de l'épithélium pulmonaire pouvant causer la mort par inhibition de la diffusion de l'oxygène. Il en est ainsi également de certains insecticides organophosphorés doués d'une action neurotoxique retardée, se traduisant par des phénomènes de dégénérescence des axones des neurones du système nerveux central avec démyélinisation conduisant à des paralysies [Encyclopédie Universalis, 2007]. Enfin, il faut envisager la possibilité *d'effets cumulatifs à travers plusieurs générations*.

Pour estimer la toxicité aiguë et la toxicité après expositions répétées, les effets cancérogènes et mutagènes des pesticides, on réalise des *études toxicologiques* sur animaux. Les études de *toxicité aiguë* orale et dermale aboutissent à l'établissement des valeurs de la dose létale 50 ( $DL_{50}$ ). La  $DL_{50}$  est une estimation statistique de la dose qui provoque la mort de 50 % d'une large population d'animaux de laboratoire traités, après que le produit ait été appliqué respectivement par gavage ou sur la peau. Les valeurs de la  $DL_{50}$  sont exprimées en mg/kg de poids corporel. La  $DL_{50}$  orale est déterminée généralement sur les rats ; tandis que pour la fixation de la  $DL_{50}$  dermale, les études peuvent être menées par exemple sur les rats ou les lapins. La fixation de la toxicité aiguë par inhalation ( $CL_{50}$ ) est également exigée pour les gaz, les formulations fumigènes, les préparations génératrices de vapeurs, de poussières, les aérosols.... Les valeurs de  $CL_{50}$  sont exprimées en mg/l d'air ; elles représentent la concentration dans l'air qui provoque la mort de 50 % des rats exposés pendant une durée de 4 heures.

La *toxicité après expositions répétées* (court, moyen et long terme) se manifeste plus tardivement. La toxicité à court et moyen terme est l'ensemble des effets toxiques indésirables résultant de l'exposition répétée à une substance, pendant une période ne dépassant généralement pas le dixième de la durée de vie de l'animal d'expérience. Pour

évaluer une exposition répétée à court et moyen terme, les différentes instances internationales considèrent qu'il faut expérimenter les composés à étudier sur deux espèces de mammifères dont l'une ne doit pas appartenir à l'ordre des rongeurs. Quant à l'exposition répétée à long terme, elle est le résultat d'une exposition prolongée à des doses répétées soit de substances s'éliminant trop lentement de l'organisme (quantité éliminée inférieure à celle absorbée ; ce sont les poisons cumulatifs comme exemple les métaux lourds) soit de substances dont les effets nocifs sont irréversibles et s'additionnent chaque fois malgré l'élimination (poisons dont chaque dose absorbée aggrave les effets). Durant les études de toxicité après exposition répétée, des doses constantes de substance (ppm ou mg de substance/kg de nourriture) sont administrées aux animaux tests. Par la suite, quelques-uns d'entre eux sont sacrifiés et leurs tissus et organes sont examinés afin de rechercher les effets éventuels des produits. Parallèlement, on vérifie si la consommation durant toute la vie de l'animal d'une nourriture ou d'une boisson contenant le produit étudié est sans effet sur lui.

Sur base des valeurs de DL<sub>50</sub> et CL<sub>50</sub>, les préparations peuvent être classées comme très toxiques, toxiques ou nocives. En outre tout autre effet toxique (par exemple toxicité répétée, effets mutagènes, cancérogènes, reprotoxiques) tant des substances actives que des adjuvants présents, doit être considéré afin d'évaluer la toxicité de la formulation. D'autres études sur le métabolisme dans les plantes et le sol et les éventuelles influences sur la vie sauvage (gibier, poissons et abeilles) sont également effectuées.

Les études de toxicité permettent d'établir les LOAELs et NOAELs définis comme suit :

- LOAEL (**L**owest **O**bserved **A**dverse **E**ffect **L**evel) (mg de s.a./kg/jour) est la plus petite quantité de substance active pour laquelle un effet néfaste a été observé sur l'animal ;
- NOAEL (**N**o **O**bserved **A**dverse **E**ffect **L**evel) (mg de s.a./kg/jour) est la quantité maximale de substance active à laquelle l'animal peut être exposé sans effet néfaste.

En se basant sur les NOAELs les plus appropriés, on fixe les valeurs acceptables d'exposition pour l'opérateur (AOEL) ou le consommateur (ADI-ARfD) :

- AOEL (**A**ceptable **O**perator **E**xposure **L**evel) (mg de s.a./kg/jour) est la quantité maximale de substance active à laquelle l'opérateur peut être exposé sans aucun effet néfaste ;
- ADI (**A**ceptable **D**aily **I**ntake) (mg de s.a./kg/jour) est la quantité journalière admissible d'un produit chimique sans effet néfaste chez un consommateur ;
- ARfD (**A**cute **R**eference **D**ose) (mg de s.a./kg/jour): quantité pouvant avoir des effets néfastes après une seule ingestion.

L'établissement des valeurs de référence (ADI-AOEL-ARfD) se fait à partir du NOAEL sélectionné (NOAEL<sub>critique</sub>) par l'équation suivante [Castelain et Vleminckx, 2004] :

$$\frac{NOAEL_{critique}}{AF} \times f$$

NOAEL<sub>critique</sub> : Niveau de concentration pour lequel on observe aucun effet dommageable ;

f : facteur de correction (en %) lié à l'absorption orale ;

AF : valeur par défaut correspondant à la variabilité interspécifique et interindividuelle. Par défaut, AF = 10 x 10.

Le choix du NOAEL critique se fait généralement comme suit.

- Si c'est le cas de AOEL on se base sur une étude subchronique à moyen terme (90 jours).
- Si c'est ADI, on se base sur une étude de toxicité chronique à long terme (2 ans ou 2 générations).
- si c'est ARfD, on se base sur des études de toxicité aiguë (28 jours).

La *dose sans effet* permet de fixer la *dose journalière acceptable* (ADI) en mg de s.a./kg/jour après l'application d'un coefficient de sécurité de 100 pour une étude de 2 ans et de 500 pour une étude de 90 jours. S'il y a le moindre doute, ce coefficient est porté à 1000. Par référence à la dose journalière acceptable (ADI) ou à la dose de référence aiguë (ARfD), sera fixée expérimentalement la limite maximale applicable aux résidus (LMR) auxquels le consommateur peut légalement être exposé. Techniquement, la fixation des LMR requiert la réalisation d'études en conditions pratiques où le pesticide est appliqué strictement selon la bonne pratique agricole (BPA) préconisée et où les résidus consécutifs à cette application sont analysés en laboratoire. Il est évident que de nombreux facteurs peuvent influencer la valeur

finale du résidu : les conditions atmosphériques, la variété du végétal, les matériels d'application utilisés... C'est pourquoi ces études doivent être répétées dans diverses conditions afin de faire intervenir toutes les sources d'influence possibles. Les résultats de ces essais sont soumis à une analyse statistique qui a pour but de déterminer la valeur maximale que le résidu peut potentiellement atteindre dans la pratique. Une évaluation de l'exposition est enfin nécessaire pour parvenir à une conclusion sur l'acceptabilité des LMR proposées et des BPA sur lesquelles elles se fondent.

Les facteurs qui influent sur l'exposition des opérateurs sont nombreux [Van Hemmen *et al.*, 1995a ; Wim *et al.*, 1997] :

- la nature de la matière active, la concentration utilisée, le type de formulation, la méthode d'application et la durée de travail ;
- la condition physique de l'utilisateur : les individus mal nourris ou de faible corpulences sont beaucoup plus facilement intoxiqués ;
- le climat joue également un rôle car, sous un climat tropical, en raison de la transpiration intense, la peau est peu couverte et les toxiques sont mieux absorbés.

#### **2.4.2 Les risques pour la santé**

Lors de l'application des pesticides, les risques pour la santé humaine proviennent essentiellement d'une exposition directe, qui peut être soit volontaire, c'est-à-dire relative aux opérateurs des produits et aux travailleurs qui pénètrent dans la zone traitée, soit non volontaire et touche dans ce cas le public ou « *bystanders* ». La caractérisation de l'exposition implique de prendre en compte la voie d'exposition et la trajectoire suivie par la substance depuis la source jusqu'à la cible (scénario d'exposition). Les produits phytosanitaires peuvent pénétrer dans l'organisme par trois voies : respiratoire (par inhalation), orale et dermique [Van Hemmen *et al.*, 1995a].

La voie respiratoire : plusieurs scénarii peuvent entraîner ce mode de contamination : l'exposition aux vapeurs/poussières des produits concentrés résultant d'une pulvérisation en hauteur et face au vent, dans un milieu fermé, d'une manipulation sans masque de protection, etc.

La voie dermique : elle est la voie de pénétration la plus importante chez les applicateurs de pesticides. L'absorption par voie dermique est influencée par les propriétés physicochimiques de la bouillie et les conditions ambiantes. Une étude réalisée par Wim *et al.* [1997] sur l'influence de l'humidité relative (13 %, 70 % et 90 %) sur l'absorption dermique de volontaires soumis à une exposition au Propoxur montre une quantité excrétée dans les urines plus importante aux humidités élevées : les quantités collectées passent de 3 à 6. La manipulation des produits sans équipements de protection adaptés et en bon état est l'une des principales causes de cette exposition. Le port de vêtements contaminés est également une autre source d'exposition, de même que le contact avec la culture traitée et la dérive.

La voie orale : cette forme de pénétration rare, survient chez les manipulateurs qui boivent, mangent et fument sans se laver les mains. D'autres cas d'ingestion peuvent survenir : c'est le cas des opérateurs qui soufflent sur la buse ou bien encore des cas rares et accidentels comme la confusion du produit avec une boisson, surtout, quand celui-ci est stocké dans une bouteille ayant contenu une boisson.

#### **2.4.2.1 L'exposition des opérateurs et des travailleurs**

L'exposition des opérateurs (Operator exposure) concerne les applicateurs qui peuvent être exposés durant toutes les phases de manipulation des produits phytosanitaires. Et parmi ces phases de manipulation, la préparation du mélange est l'activité la plus risquée [Delannoy, 2003]. Selon Thielen [2002], 70 % de l'exposition a lieu durant cette opération. L'exposition peut se faire également avec le contact de la plante traitée.

L'exposition des travailleurs (Worker exposure) qui pénètrent dans une zone traitée se fait essentiellement par voie dermique suite au contact de leur corps avec le feuillage ou avec le sol. La quantité de résidus sur le feuillage dépend de la quantité de matière active pulvérisée à l'hectare, de la rémanence du produit, du type de surface traitée : c'est-à-dire du rapport entre la surface foliaire (LAI ou Leaf Area Index) et la surface du sol sur laquelle se trouve la culture. Les expositions des travailleurs par le feuillage et par le sol traité sont données par les formules suivantes [Sturbault *et al.*, 2006 ; Vleminckx, 2006].



Par le feuillage :

$$DE = 0,001 \times DFR \times TF \times T \times P$$

DE : exposition dermique (mg s.a./personne x jour) ;

DFR : résidu foliaire délogeable ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  par kg appliqué/ha) ;

TF : facteur de transfert ( $\text{cm}^2/\text{personne}/\text{jour}$ ) (culture basse : 5 000/personne/heure ; culture haute : 30 000/personne/heure) ;

T : temps de travail (heures/jour) ;

P : facteur dépendant de la protection (avec EPI : 0,1 ; sans EPI : 1).

Par le sol :

$$DE = \frac{Conc_s \times DA_s \times SA_c \times T_{s/sk}}{\rho_{soil}}$$

DE : exposition dermique (mg s.a./personne x jour) ;

Conc<sub>s</sub> : concentration du sol en substance active ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) ;

DA<sub>s</sub> : adhérence du sol sur la peau ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) (par défaut : 0,44  $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) ;

SA<sub>c</sub> : surface de la peau contaminée ( $\text{cm}^2$ ) (par défaut : 820  $\text{cm}^2$ ) ;

$\rho_{soil}$  : densité apparente du sol ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) ;

T<sub>s/sk</sub> : transfert du sol vers la peau (-).

#### 2.4.2.2 L'exposition des « bystanders »

L'exposition directe non volontaire atteint les personnes qui se trouvent accidentellement sur les lieux du traitement. Les particules persistantes dans l'atmosphère peuvent être des sources non moins importantes de contamination. L'exposition se fait par le phénomène de dérive du produit lors de l'application par la voie dermique et inhalatoire selon les équations suivantes [Vleminckx, 2006] :

$$DE = AR \times \text{dep\^ot par d\^erive} \times EA \times f_r$$

DE : exposition dermique (mg s.a./personne x jour) ;

AR : dose appliquée (mg s.a./m<sup>2</sup>) ;

dépôt par dérive : dépend du type de culture, état de développement de la culture et de la distance (à une distance de 7,5 m : 0,13 % pour une culture basse et 2,6 % pour une culture haute) ;

EA : surface exposée (m<sup>2</sup>/personne/jour) (par défaut : 0,4225 m<sup>2</sup>/personne/jour) ;

f<sub>r</sub> : facteur de réduction si l'appareil de traitement est amélioré par une buse antidérive.

L'exposition par inhalation quant à elle est calculée par :

$$I = AR \times TSF \times T$$

I : exposition inhalatoire potentielle (mg s.a./personne x jour) ;

AR : dose appliquée (kg s.a./ha) ;

TSF : facteur spécifique à l'activité (Il varie de 0,1 à 0,03 selon l'activité. Elle est de 0,1 pour la taille et 0,01 pour le tri) ;

T : durée d'exposition (heures/jour).

### 2.4.2.3 Les effets de l'intoxication

L'agence américaine Environmental Protection Agency (EPA) a décrit cinq durées générales d'exposition utilisées pour chacune des voies étudiées [1996].

- (1) Exposition d'une journée (aiguë).
- (2) Exposition de courte durée (1 à 30 jours).
- (3) Exposition de durée moyenne (30 à 180 jours).
- (4) Exposition de long terme ou chronique (durée de plus de 6mois).
- (5) Exposition durant toute la vie (risques cancérigènes).

Ces cinq durées peuvent engendrer une intoxication aiguë ou à long terme.

#### **a) Intoxication aiguë**

C'est l'empoisonnement dû à une seule exposition, à une forte dose de produit et ses conséquences directes chiffrées DL<sub>50</sub> (doses létales 50). En général, cette forme d'intoxication arrive par accident ou par manque de précautions et c'est le cas :

- si une bouteille de formulation concentrée est renversée et touche la peau ;
- si des particules de poudre mouillable sont inhalées ;
- si le produit est bu ou mangé ;
- si on ne porte pas d'équipements de protection lors du traitement.

Les conséquences de l'intoxication aiguë se manifestent souvent dans les 24 heures par des vomissements, respiration difficile, arrêt du cœur, etc.

### ***b) Intoxication à long terme***

C'est l'intoxication qui survient à la suite de l'absorption répétée, pendant de longues périodes, de faibles quantités de doses ne présentant pas de danger direct. Les produits s'accumulent dans l'organisme et les symptômes apparaissent souvent après plusieurs années : c'est le cas d'ouvriers qui professent dans ce métier. Les effets d'une intoxication chronique sont en général graves et irréversibles, ils se manifestent généralement par des effets cancérigènes, neurologiques et des effets sur la reproduction et le développement.

#### Les effets cancérigènes

Les études épidémiologiques n'identifient que très rarement un pesticide en particulier et parlent plutôt de types de pesticides. Toutefois, malgré les incertitudes qui persistent encore sur le potentiel cancérigène des produits phytosanitaires, les résultats pris dans leur ensemble supposent un risque de cancer non négligeable pour de nombreux scénarios d'exposition aux pesticides.

#### Les effets sur la reproduction et développement

Les pesticides ont été identifiés en tant qu'agents susceptibles de porter atteinte au processus de fertilité masculine, via une toxicité testiculaire [Slutsky *et al.*, 1999 ; Cohn *et al.*, 1978 ; Wyrobeck *et al.*, 1981 ; Schrader *et al.*, 1988 ; Lerda *et al.*, 1991]. Les résultats de De Cock *et al.* [1995] ont prouvé un Délai Nécessaire à Concevoir (DNC) plus élevé chez les couples qui avaient essayé de concevoir pendant une saison d'épandage si les pesticides avaient été employés par le père. Arbuckle *et al.* [1998] ont montré un effet de l'exposition professionnelle maternelle aux pesticides sur le risque de mortalité intra-utérine et sur la diminution de la croissance fœtale. L'action perturbatrice endocrinienne des pesticides peut interférer à la synthèse, la libération, le transport, le métabolisme, la liaison, l'action ou

l'élimination des hormones naturelles [Rahimi *et al.*, 2007 ; Ning *et al.*, 2007 ; Rangoonwala *et al.*, 2005 ; Lecoeur *et al.*, 2005].

### Les effets neurologiques et neurocomportementaux

Pour certains pesticides, le mécanisme du mode d'action est la neurotoxicité (inhibition de l'activité acétylcholinérasique). Les effets aigus survenant à des doses importantes sont connus, notamment, en raison des intoxications accidentelles ou volontaires (tentatives de suicide). D'autres informations sur la neurotoxicité potentielle de certains produits sont répertoriées et ceux-ci concernent principalement les organophosphorés et les carbamates, mais également les anciens organochlorés (DDT) qui peuvent entraîner des convulsions épileptiformes ; les pyréthrinoïdes sont les causes des paresthésies (convulsions à des doses massives) et les dérivées de l'urée peuvent être à l'origine de polyneuropathie, de troubles neurologiques centraux [Dési *et al.*, 1998 ; Glynn, 2006 ; Feng *et al.*, 2006 ; Beard, 2006].

En ce qui concerne les effets chroniques dus aux expositions de faible importance répétées sur une longue durée, les connaissances restent vagues et les principaux effets chroniques étudiés sont les neuropathies périphériques, les troubles neuro-dégénératifs tels que la maladie de Parkinson et les troubles neuro-comportementaux [Stallones *et al.*, 2002 ; Gorell *et al.*, 2004].

### **2.4.3 Les risques pour l'environnement**

En général, le lien santé-environnement lié aux pesticides est dû à leur persistance dans les milieux naturels. La cause principale de ce problème pourrait être le transport des agents polluants de la plante ou ils sont appliqués vers les airs, les eaux ou autres ressources naturelles via différentes voies.

Lors de l'application des produits phytosanitaires, on estime que 30 à 50 % des produits se retrouvent dans l'air [Van den Berg *et al.*, 1999]. Selon Majewski *et al.* [1998], Bidleman [1999], Unsworth *et al.* [1999], Van Pul *et al.* [1999], Kumar [2001], les pesticides entrent en contact avec l'atmosphère durant leur application par phénomènes de volatilisation (sol et cultures), de photolyse avec l'oxyde d'hydrogène atmosphérique et par l'effet du vent

(dérive). Leur distribution est influencée par leurs propriétés physico-chimiques mais aussi les facteurs environnementaux tels que les conditions météorologiques [Hapeman *et al.*, 2003].

Les conséquences de la dissémination de ces produits dans l'atmosphère sont la pollution des écosystèmes terrestre et aquatique. Outre la toxicité par voies dermique et inhalatoire sur les populations, les produits une fois transférés dans le réseau hydrographique constituent une contamination de la ressource.

L'utilisation des pesticides a également des conséquences sur la biodiversité (espèces pollinisatrices, auxiliaires biologiques, microflore et microfaune des sols, etc.). D'où l'importance des études écotoxicologiques dans les processus d'homologation. La Directive 91/914/CEE exige un dossier portant sur les études d'impact sur la faune et flore du sol.

## **2.5 LES METHODES D'ESTIMATION DE L'EXPOSITION DES OPERATEURS AUX PRODUITS PHYTOSANITAIRES**

Plusieurs méthodes de mesures de l'exposition des opérateurs aux produits phytosanitaires existent [Schneider *et al.*, 2000 ; Castro Cano, 2000]. Elles sont soit quantitatives [Van Hemmen, 1995], qualitatives, soit basées sur la modélisation.

### **2.5.1 Les méthodes quantitatives**

#### **2.5.1.1 Méthode des patchs**

La méthode des patchs fait appel à des mesures d'absorption du produit par des pièces de matières absorbantes (cellulose, nitrocellulose, papier chromatographique, etc.) placées en divers endroits du corps (aussi bien à l'extérieur de l'équipement qu'à l'intérieur de l'équipement). Les patchs ont une surface d'environ 10 cm x 10 cm. A l'issue du traitement, le produit est extrait des éléments de mesure, puis analysé selon la méthode appropriée à la matière active. Ceci donne des quantités de produit en  $\mu\text{g/patch}$  ou  $\mu\text{g/cm}^2$ . Puisque, chaque endroit ou partie du corps équivaut à une surface bien déterminée (Tableau 2.1.), les résultats sont extrapolés pour chaque partie du corps pour ensuite être généralisés à l'ensemble du corps. Les erreurs sont liées à l'extrapolation de la surface [OCDE, 1997].

Cette méthode permet à la fois de quantifier l'exposition potentielle et effective [Castro Cano, 2000 ; Durham *et al.*, 1962 ; WHO, 1975 ; WHO, 1986 ; EPA, 1987]. Elle permet également de vérifier le niveau d'efficacité des équipements. Selon une étude de l'OCDE [1997], le passage du produit dans les équipements est influencé par de nombreux facteurs dont la robustesse, le type de formulation (liquide ou solide). Une étude de quantification de l'exposition aux produits phytosanitaires au cours d'un traitement expérimental sur la vigne a été réalisée par Jean *et al.* [2004] avec cette méthode sur un opérateur sans équipement de protection et sur un autre avec un équipement de protection constitué de bottes, gants latex, d'une combinaison en Tyvek jetable et d'un casque de protection. Elle a permis de mettre en évidence l'importance du port de l'ensemble des équipements de protection tout au long des différentes phases du traitement. Ces auteurs démontrent que, lors de cet essai, la réduction du taux de contamination apportée par l'ensemble du dispositif de protection mis en œuvre a atteint 88 % durant la préparation et même 99 % pendant l'application. Ils admettent cependant en conclusion que ce type d'essai devrait être répété.

Tableau 2.1. : Surface correspondant à chaque partie corporelle.

Parties corporelles	Surface (cm <sup>2</sup> )	Position du patch
Tête et face	1300	Tête (front)
Face	650	
Nuque	110	Nuque
Gorge	150	Gorge
Dos	3550	Dos
Thorax	3550	Thorax
Bras	2910	Chaque bras
Avant bras	1210	Chaque avant-bras
Cuisses	3820	Chaque cuisse
Tibias	2380	Chaque tibia
Pieds	1310	Chaque pied
Mains	820	Gants ou méthode de lavage des mains

Source: OCDE, 1997

### 2.5.1.2 Méthode de mesure sur l'ensemble du corps (« Whole body methods »)

L'opérateur porte un dosimètre (une sorte de survêtement complet et léger) qui couvre l'ensemble du corps. Fenske *et al.* [1990] et Cano *et al.* [2000] ont utilisé cette méthode pour mesurer l'exposition par voie dermique des applicateurs au chlorpyrifos-méthyl et fenitrothion sur une pelouse. Les premiers ont utilisé comme solvant d'extraction l'acétone, tandis que les seconds ont utilisé le toluène. Chester *et al.* [1993] ont proposé une méthode standard basée sur un équipement porté qui couvre l'ensemble du corps. Une étude comparée des niveaux d'exposition réalisée par Machera *et al.* [1998] dans différentes conditions montre des différences approximatives de 50 % entre la méthode des patches et la méthode de mesure sur l'ensemble du corps. Fenske *et al.* [1993] signalent que l'emplacement des patches peut entraîner les différences des résultats. Vidal *et al.* [1998] présentent différentes méthodes pour analyser plusieurs pesticides avec différents types d'équipements de protection.

### 2.5.1.3 Mesures sur les mains

C'est la mesure d'exposition par voie dermique qui semble la plus importante [OCDE, 1997]. Une étude de Jean *et al.* [2004] a montré que durant la phase de préparation du mélange, 99,3% de la contamination se situe au niveau des mains et que le port de gants en latex permet d'éliminer 89 % de cette contamination. Plusieurs méthodes de mesure d'exposition ont été mises au point parmi lesquelles on peut citer la méthode des gants absorbants : il s'agit de gants en coton permettant de collecter les produits pendant le travail. Ces gants placés soit à l'extérieur soit à l'intérieur des gants de protection, selon l'estimation qu'on souhaiterait, permettent à la fin du travail de recueillir le produit pour l'analyser selon la méthode appropriée à la matière active. C'est une méthode simple à mettre en œuvre. Néanmoins, le risque est surestimé compte tenu de la capacité d'absorption plus élevée des gants aux mains nues [EPA, 1987 ; cité par OCDE, 1997] ; le suivi biologique est aussi impossible. Il existe d'autres alternatives consistant à rincer les mains avec un solvant approprié ou avec l'eau savonneuse pour ensuite récupérer le filtrat [Brouwer *et al.*, 2000a]. Dans ce cas, on est confronté à une sous-estimation car ce qui est absorbé par la peau n'est pas récupéré. En plus, les volontaires utilisés durant les expériences sont exposés [OCDE, 1997].

#### 2.5.1.4 Mesures respiratoires

La mesure du produit inhalé peut se faire grâce à un échantillonneur d'air individuel. Il s'agit en quelque sorte d'un masque à cartouche qui collecte les particules et vapeurs inspirées. On peut également procéder à la collecte des résidus de vapeurs ou de poussières dans l'atmosphère via un système de collecteurs. Dans ce cas, l'exposition inhalatoire potentielle peut être extrapolée par la formule suivante [Sturbaut *et al.*, 1999], cité par Thielen.[2002] ; Lundehn *et al.*[1992] :

$$PIE = \frac{1,74 C t}{m}$$

PIE : Exposition Inhalatoire Potentielle ( $\mu\text{g}/\text{kg s.a.}$ ) ;

C : concentration du pesticide dans l'air ( $\mu\text{g}/\text{l}$ ) ;

t : temps de l'exposition en heures ;

m : quantité de substance active manipulée en kg ;

1,74 : volume moyen inhalé par heure pour un adulte ( $\text{m}^3/\text{h}$ ).

#### 2.5.1.5 Le monitoring biologique

C'est une méthode qui présente de nombreux avantages. La quantification se fait par analyses biologiques des composés ou métabolites des excréments salivaire, respiratoire, urinaire et sanguine. Les mesures sur urines sont les plus courantes car elles sont non invasives et la collecte est relativement simple [OCDE, 1997 ; Van Hemmen *et al.*, 1995].

En 2001, les experts de l'institut national de santé publique du Québec ont fait des prélèvements urinaires sur des enfants âgés de 3 à 7 ans. L'étude visait à améliorer le niveau de connaissance à l'exposition résidentielle des enfants québécois aux insecticides organophosphorés et aux herbicides chlorophénoxy utilisés pour l'entretien des pelouses.

Plusieurs auteurs ont utilisé le biomonitoring pour mesurer l'exposition. Wim *et al.* [1997] ont fait des collectes d'urine sur des volontaires pour étudier l'influence de l'humidité sur l'absorption du propoxur par voie dermique. Krieger *et al.* [2001] ont fait une étude de surveillance biologique de l'exposition au chlorpyrifos aux USA sur des personnes



de différents âges et de sexe dont les appartements sont traités avec des produits insecticides contenant du chlorpyrifos. Dans cette étude, les métabolites urinaires (trichloro-2-pyridinol et la créatine) sont extraits par des solvants puis analysés par chromatographie. Les prélèvements sanguins sont rarement utilisés car il s'agit de méthode invasive, et les corrélations entre concentrations observées dans le sang et celles absorbées ne sont pas parfaites [OCDE, 1997].

### 2.5.2 Méthode qualitative par analyse d'images

La méthode consiste à pulvériser avec un traceur fluorescent. A la fin du traitement, les opérateurs sont éclairés par une lumière ultraviolette et le produit est quantifié par VITAE system [Brouwer *et al.*, 2000b]. Il s'agit d'un système par analyse d'images numériques comportant une caméra et des sources lumineuses. Le faisceau lumineux est projeté sur la partie corporelle à analyser située à 1 m. Brouwer *et al.* [2000b] et Bierman *et al.* [1998] ont utilisé cette technique pour analyser l'exposition chez des agriculteurs.

### 2.5.3 Modélisation de l'exposition

Les méthodes traditionnelles utilisées pour quantifier l'exposition aux produits phytosanitaires sont coûteuses et lourdes à mettre en œuvre. A cet égard, les modèles apparaissent comme une alternative permettant d'apporter une réponse rapide à l'évaluation du risque d'exposition avant la mise à disposition du produit sur le marché. Elle permet également d'effectuer des économies sur des études qui sont à la fois coûteuses et complexes.

L'*évaluation du risque* repose sur la comparaison entre les quantités susceptibles d'être observées au niveau de l'opérateur (*évaluation de l'exposition*) et l'AOEL (Acceptable Operator Exposure Level) est la valeur toxicologique de référence (« *plafond toxicologique* » établi sur base des études toxicologiques). L'évaluation de l'exposition est établie sur la base d'estimations de l'exposition réalisées selon différents modèles (déterministes ou probabilistes) ou sur la base de mesures en conditions réelles (essais).

L'évaluation de l'exposition aux pesticides dans le cadre d'une homologation repose sur une approche à différents niveaux ou « paliers » (Figure 2.3.) [OCDE, 1997 ;

Mitchell *et al.*, 2001 ; Groeneveld *et al.*, 2001 ; Makinen, 2003]. Cette méthode vise à augmenter le réalisme de l'exposition au fur et à mesure de la progression dans les niveaux. Ainsi, à chaque niveau, il doit être prouvé que la quantité à laquelle l'opérateur est exposé ne dépasse pas l'AOEL [Van Hemmen, 1999 ; Mitchell et Campbell., 2001 ; Groeneveld et Van Hemmen., 2001].

Premier niveau : on utilise des données génériques d'exposition applicables au scénario de traitement disponible pour donner une estimation ponctuelle conservatoire afin d'estimer l'exposition potentielle totale. La valeur conservatoire est issue de bases de données collectées au cours d'études antérieures sur des mesures d'exposition obtenues expérimentalement selon un scénario de traitement (type de culture, type de pulvérisateur, surface journalière traitée, type de formulation, volume/ha, durée d'application). Le classement des données d'exposition expérimentale puis l'analyse de leur distribution statistique permet de sélectionner suivant le modèle, la valeur (moyenne géométrique, 75<sup>ème</sup> percentile, 90<sup>ème</sup> percentile,...) qui sert de valeur de substitution dans le modèle d'exposition. La Figure 2.2 montre les valeurs critiques retenues comme valeurs de substitution dans une distribution log-normale des doses de la substance active pour un scénario de traitement.

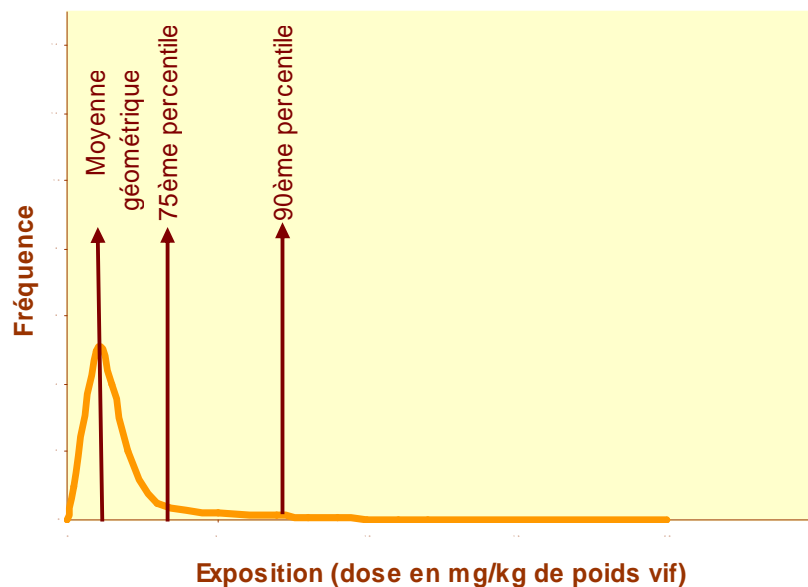


Figure 2.2. : Schéma montrant les valeurs critiques choisies dans une distribution log-normale comme valeurs de substitution pour les modèles mathématiques

Deuxième niveau : l'exposition est évaluée par modélisation sur base des données génériques. On tient compte de valeurs plus précises d'absorption cutanée lors de l'estimation de l'exposition, valeurs obtenues sur base d'études réalisées avec la formulation in vivo chez le rat et/ou d'études in vitro sur la peau humaine et de rat. On compare l'exposition généralement à un AOEL systémique. A ce niveau on tient également compte des équipements de protection individuelle (EPI).

Troisième niveau : l'exposition est aussi évaluée par modélisation. Elle intègre les données spécifiques issues de mesures réelles d'exposition de l'opérateur au champ et le monitoring biologique en conditions réelles.

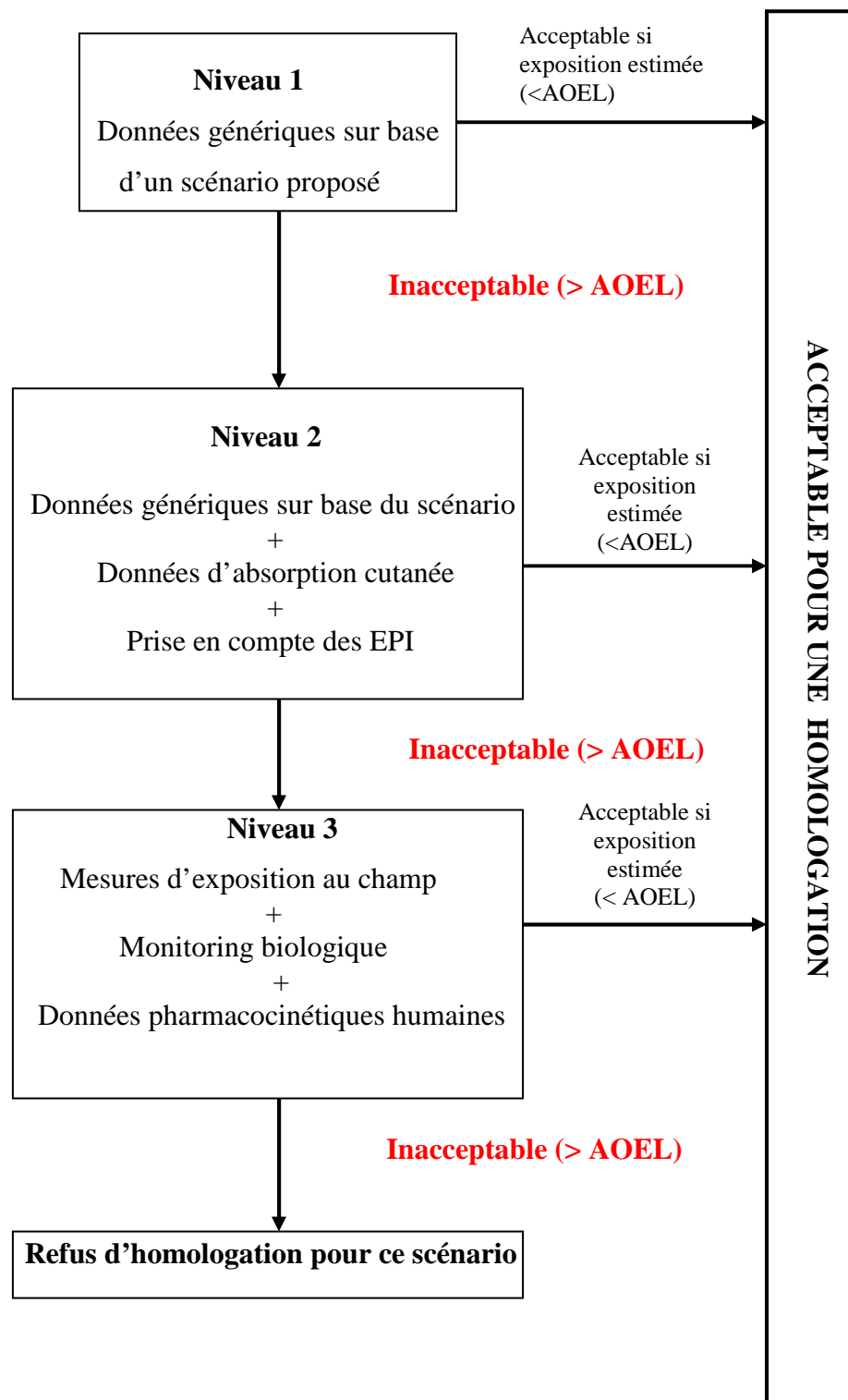


Figure 2.3. : Les étapes de l'évaluation de l'exposition des opérateurs.

### **a) Les modèles déterministes dans l'évaluation de l'exposition**

Cette méthode a été largement utilisée dans les 10 dernières années. Plusieurs modèles et logiciels basés sur cette approche déterministe ont été mis au point par des pays d'Europe et d'Amérique du Nord pour évaluer l'exposition des humains aux pesticides. Actuellement, quatre modèles de calcul sont disponibles en Europe : le UK POEM, le GERMAN Model, le DUTCH Model et l'EUROPOEM [Lundehn *et al.*, 1992 ; Van Drooge, 2001].

L'approche des modèles est intermédiaire entre l'approche traditionnelle (modèles empiriques) et les méthodes probabilistes. Elle consiste à classer les valeurs d'exposition et utilise les distributions statistiques pour choisir la valeur caractérisant l'évaluation de l'exposition (*valeur critique*) (Figure 2.2).

Cette approche déterministe même si elle paraît simple, facile à comprendre et à interpréter, présente des limites :

- la distribution observée insiste sur un point, ce qui est assez limité si on cherche à caractériser la variabilité du risque dans une population ;
- elle ne prend pas en compte les incertitudes dans la modélisation, ou tout au plus celles associées à la variabilité de l'exposition entre les populations.

Selon Van Drooge *et al.* [2001], pour corriger les limites des méthodes déterministes, les méthodes probabilistes de l'évaluation de l'exposition sont essentielles pour l'évaluation de risque.

#### Le modèle britannique

La version 2.0 du modèle UK POEM (UK **P**redictive **O**perator **E**xposure **M**odel) a été développée par les autorités nationales et par l'industrie britannique. Elle est présentée sur une feuille Excel (Tableau 1., Annexe1.). Un certain nombre de données doivent être introduites dans le modèle (« INPUT DATA ») et concernent.

- Le produit et la substance active, le type de formulation (EC,SC,WP,WG), du pourcentage d'absorption cutanée de la matière active contenue dans le produit et dans la bouillie, le conditionnement et la dose conseillée (en kg de produit/ha), le volume d'application (en l/ha), la concentration en substance active (en mg/g ou en mg/ml), le port ou non de gants de protection pendant la préparation et

l'application (il est conseillé que l'opérateur porte des vêtements perméables), la durée de la pulvérisation (sinon, on prend 6 heures comme valeur par défaut).

- La superficie traitée journalièrement qui est estimée à 50 ha/jour pour les cultures au sol, 8 à 30 ha/jour pour une application en hauteur et 1 ha/jour pour une pulvérisation manuelle.

La contamination par opération (en ml ou mg/opération) ne tient compte que de l'exposition des mains et ne prend pas en compte l'inhalation lors de la préparation de la bouillie de pulvérisation. L'exposition par voie dermique à cette occasion est considérée comme étant directement fonction de la quantité de substance active manipulée, la taille des emballages manipulés et leur type (dimensions et ouvertures). Les valeurs de substitution sont les 75<sup>èmes</sup> percentiles des valeurs obtenues expérimentalement.

Le modèle calcule les valeurs d'exposition pour la préparation et pour l'application (mg de matière active par jour) en trois étapes.

*1<sup>ère</sup> étape (pendant la préparation) :* le modèle ne tient compte que de l'exposition par voie dermique via les mains (et non pas de l'inhalation). L'exposition est fonction du nombre d'emballages utilisés par jour, de leur taille et du diamètre des couvercles, de la quantité de substance active manipulée et de la formulation.

*2<sup>ème</sup> étape (pendant l'application) :* le modèle calcule les valeurs d'exposition par la voie inhalatoire et par la voie dermique via les mains, les jambes et le corps.

*3<sup>ème</sup> étape :* enfin, le modèle calcule la quantité de matière active absorbée par jour (mg s.a./kg/jour), pour un homme de 60 kg.

Il existe une nouvelle version améliorée du 3.0 du modèle UK POEM qui pour les formulations solides tient compte de l'exposition inhalatoire pendant la préparation (« Mixing and Loading ») et qui se base sur les 75<sup>èmes</sup> percentiles des valeurs du modèle allemand.

### Le modèle allemand

Le « GERMAN Model » s'appuie sur une base de données génériques issues d'études menées par l'industrie agrochimique allemande [Thielen, 2002]. Comme le modèle britannique, il est présenté sur une feuille Excel (Tableau 2., Annexe1.) et les données à introduire concernent.

- Les données relatives au produit et à son usage : il s'agit du type de formulation (liquide, WP ou WG), de la concentration en matière active (en mg/ml), de la dose d'emploi du produit (en l/ha).
- Les équipements de protection portés au cours de la préparation et de la pulvérisation (gants, combinaison imperméable, bottes, masque P2, masque A1P2, écran de protection avec chapeau et couvre chef à large bord).
- Le % d'absorption par la peau ainsi que de la méthode d'application.

Le pourcentage d'absorption dermique permet de convertir une exposition externe en exposition interne.

Le modèle offre le choix entre 4 scénarios de pulvérisation dont chacun d'entre eux correspond à une surface journalière traitée : 20 ha/jour au moyen d'un pulvérisateur monté sur un tracteur pour une application au sol ou sur culture basse, 8 ha/jour pour une pulvérisation en hauteur et 1 ha/jour en cas d'application manuelle porté par l'utilisateur en culture haute et enfin 1 ha/jour en cas d'application manuelle en culture basse. Les valeurs de substitution sont la moyenne géométrique des valeurs expérimentales disponibles pour le scénario d'application sélectionné. Le modèle effectue le calcul en 3 temps :

1<sup>er</sup> temps : l'exposition potentielle

Pour chacune des composantes (inhalatoire, orale et dermique), l'exposition est calculée à partir des données génériques, en considérant la surface traitée et la dose d'application.

2<sup>e</sup> temps : l'exposition effective

Cette valeur est obtenue en prenant en compte le port d'équipements de protection. Le modèle prend en compte le port de gants, le port d'une combinaison imperméable et de bottes, et masque à gaz. Ainsi, on applique un coefficient de 1 % dans le cas du port de gants et 5 % dans le cas d'un bon vêtement de protection.

3<sup>e</sup> temps : le modèle donne les totaux des expositions potentielle et effective, au niveau inhalatoire et dermique (lors de la préparation et de l'application). Ces expositions corrigées par le pourcentage d'absorption et sommées donnent la quantité totale de matière active absorbée par jour. Ce résultat est ramené en mg de s.a./kg/jour pour un homme de 70 kg.

### Le modèle Néerlandais

Le DUTCH Model n'est pas basé sur des essais mais plutôt sur toutes les études disponibles dans la littérature. Il prend en compte le 90<sup>ème</sup> percentile pour estimer l'exposition potentielle [Kangas et Sihvonen, 1996 ; Castelain et Vleminckx, 2004].

Comme les deux modèles précédemment étudiés, le modèle néerlandais est sous format Excel (Tableau 3., Annexe 1) et les paramètres à introduire concernent.

- Les données relatives au produit et à son usage : le type de formulation (liquide ou solide), la concentration en matière active (en mg/ml), le volume de bouillie pulvérisé à l'ha (en l/ha), la dose du produit à l'ha (en l/ha).
- Le temps de préparation de la bouillie est estimé à 1 heure/jour pour un temps d'application de 4 à 6 heures/jour.

Les superficies traitées par jour sont plus réduites et estimées à 10 ha/jour pour les pulvérisations basses, 6 ha/jour pour les applications hautes et 1 ha/jour pour une application manuelle (pulvérisateur à dos) ; il existe également un scénario de traitement aérien. Le modèle calcule l'exposition potentielle (sans vêtement de protection) et laisse aux experts le soin d'estimer l'exposition effective. Celle-ci est jugée proche de l'exposition potentielle, ce qui paraît excessif. L'exposition fournie par le modèle néerlandais peut être considérée comme un « worst case » car l'opérateur n'est ni protégé, ni censé de suivre les recommandations de sécurité écrites sur l'étiquette.

### Le modèle harmonisé dans l'EU

Dans le cadre de la Directive 91/414/CEE, un groupe d'experts mixte (industrie/autorités) a été chargé par la Commission européenne de mettre au point le modèle EUROPOEM (**E**uropean **P**redictive **O**perator **E**xposure **M**odel) présenté au Tableau 4 en Annexe 1. Ce modèle intégrerait à la fois les données des modèles nationaux et le Pesticides Handlers Database (PHED) développé par les USA et le Canada. La première version EUROPOEM 1 fut mise en place en 1996 [Mäkinen, 2003]. Le nombre de données de cette première version semble très réduit et peu représentatif pour pouvoir quantifier certains scénarios d'exposition. C'est ainsi que la version améliorée EUROPOEM 2 est en cours d'élaboration. Cette nouvelle version va intégrer d'autres applications telles que les traitements de semence, les traitements en serre et les personnes présentes sur les lieux. Elle traite séparément les phases de travail et envisage les équipements de protection individuelle.



Quant au choix des valeurs de substitution, le modèle s'adapte en fonction de la quantité de données qui lui est soumis. Ainsi, quand le nombre de données est faible, le modèle indique une insuffisance de données. Pour 15 à 20 données issues de quelques études, le modèle utilise la valeur maximale comme valeur de substitution. Pour 20 à 50 données issues d'une dizaine d'études, il donne le 90<sup>ème</sup> percentile. Pour 50 à 100 points, le modèle travaille avec le 75<sup>ème</sup> percentile. Quand la base est suffisamment large, le modèle travaille sur les moyennes géométriques ou arithmétiques [Anon, 1997 ; Van Hemmen, 2001].

A l'aide de la base de données EUROPOEM 2, Hamey [2001] a établi, sous forme d'une distribution fréquentielle, l'exposition potentielle du corps et des mains de l'opérateur ainsi que l'exposition par inhalation, durant la phase de préparation et la phase d'application. Il démontre qu'il existe des corrélations positives et fortes entre l'exposition potentielle des mains avec celle du corps durant la préparation comme durant l'application de la bouillie. Enfin, à un degré moindre, il existe aussi une corrélation entre l'exposition potentielle du corps durant l'application et celle des mains.

#### ***b) Modèles probabilistes dans l'évaluation de l'exposition***

L'application des méthodes probabilistes dans l'évaluation du risque permet de prendre en compte toutes les informations disponibles, associées à l'exposition et considèrent leurs évènements probables. Les approches probabilistes fournissent une estimation du risque sous forme d'une probabilité et contrastent donc avec l'approche déterministe où on fait l'hypothèse de conditions défavorables, où l'incertitude est prise en compte à travers l'utilisation d'un facteur de sécurité. Les méthodes probabilistes amènent plus de transparence dans l'estimation du risque. Elles reconnaissent la possibilité intrinsèque d'un impact et fournissent une estimation quantitative du risque associé. Un autre avantage que ces méthodes offrent est, la possibilité de sélectionner les paramètres d'entrée du modèle qui seront intégrés dans l'analyse. La sélection devra se baser sur l'incertitude de ces paramètres et sur la sensibilité du modèle aux variations de ces paramètres par une analyse de sensibilité. L'idée est de se concentrer sur les paramètres dont l'incertitude a une influence conséquente sur les prédictions du modèle.

Il existe différentes méthodes de prise en compte de l'incertitude, comme l'analyse d'intervalle, les statistiques Bayésiennes, la méthode Monte Carlo, la logique floue. Selon Dubus [2004], la méthode Monte Carlo est la plus largement utilisée car :

- elle est basée sur un concept simple à comprendre et à mettre en œuvre ;
- elle permet de prendre en compte les corrélations entre paramètres ;
- elle peut être utilisée pour déterminer l'incertitude des prédictions du modèle mais également sa sensibilité.

De nombreux logiciels permettant la modélisation de type Monte Carlo sont disponibles. Une des questions importantes dans la modélisation de Monte Carlo est la sélection des paramètres d'entrée du modèle qui seront intégrés dans l'analyse. Une fois que ce travail de sélection est effectué, il s'agit d'attribuer à ces paramètres des fonctions de probabilité décrivant leur incertitude et de paramétrer ces fonctions. Trois cas sont possibles.

1<sup>er</sup> cas : si on dispose de beaucoup de données, il suffit d'utiliser un logiciel statistique classique et de faire passer une fonction de probabilité par les différentes données (on parle de «distribution fitting»).

2<sup>ème</sup> cas : si on n'a pas du tout de données, on peut se référer à la littérature ou à un jugement d'expert, en tenant compte de quelques règles (par exemple, la loi des grands nombres).

3<sup>ème</sup> cas : si on a un nombre limité de données et que l'on sait que les valeurs du paramètre sont généralement distribuées selon une loi précise (par exemple, normale ou log-normale), on pourra paramétrer les fonctions de distribution à l'aide de relations statistiques.

Il reste alors à procéder à un échantillonnage de type Monte Carlo et au final, on obtiendra une courbe cumulée avec en abscisse, des classes de quantités en pesticide prédites, et en ordonnée, la fréquence.

De nombreux auteurs ont utilisé les méthodes probabilistes dans l'évaluation du risque d'exposition soit à caractère environnemental [Dubus, 2004], soit de l'opérateur par les produits phytosanitaires. Duncan *et al.* [2005] ont étudié le risque d'exposition chez les applicateurs et assistants pour un scénario d'application des pesticides avec des canons d'irrigation. Price *et al.* [2001] ont évalué les risques d'exposition causés par l'accumulation et la concentration des pesticides en faisant des simulations sur des doses en provenance de diverses sources : alimentaires, lieux d'habitation (air) et dans les eaux souterraines. Lunchick [2001] a évalué l'exposition chez des opérateurs et dans les habitations en simulant les paramètres d'entrée par la méthode de Monte Carlo. Hamey [2001] a utilisé le même procédé

pour illustrer les potentialités des méthodes probabilistes pour estimer l'exposition de l'opérateur aux pesticides.

Les limites des méthodes probabilistes sont la difficulté pour la prise de décision. Quelles incertitudes faut-il prendre en compte dans ce cas ? Doit-on se limiter à l'incertitude liée aux paramètres d'entrée du modèle ? Doit-on prendre en compte l'incertitude liée au modèle ou prendre en compte l'incertitude pour tout le processus de modélisation ? La prise de décision sur base de modélisation classique est plus aisée puisqu'elle s'appuie sur des règles claires et précises.

## **2.6 CONCLUSION**

Les pesticides ou produits phytosanitaires sont développés afin de lutter contre les ennemis des cultures. L'absence de protection phytosanitaire a des conséquences néfastes car elle entraîne une baisse des rendements, peut être à l'origine de toxines libérées par des champignons, de présence d'insectes dans les aliments... Cependant, un usage inapproprié des pesticides risque d'être à l'origine de la contamination des différents compartiments de l'environnement et d'induire l'apparition de résidus sur les produits alimentaires. Par ailleurs, des méthodes d'application inadéquates peuvent provoquer des problèmes de santé au niveau des opérateurs, en engendrant une toxicité aiguë ou à long terme. Ce travail se focalise essentiellement sur ce deuxième aspect.

Au cours de leur application, les produits phytosanitaires peuvent pénétrer dans l'organisme par trois voies principales. Une contamination par la voie respiratoire peut se produire par l'exposition aux vapeurs/poussières des produits phytopharmaceutiques résultant d'une pulvérisation en hauteur et face au vent, dans un milieu fermé, d'une manipulation sans masque de protection, etc. La voie cutanée est la voie de pénétration la plus importante chez les applicateurs de pesticides. Elle résulte de la manipulation de produits sans équipements de protection adaptés, du port de vêtements contaminés, du contact avec la culture traitée. La contamination par voie orale survient de manière plus accidentelle, comme par exemple dans le cas de confusion du produit avec une boisson.

Dans les deux premiers cas de contamination (voie respiratoire et voie cutanée), la dérive des pesticides joue un rôle majeur. Elle est définie comme la quantité de produit pulvérisé qui, déplacée par les courants d'air, retombe sur le sol ou s'évapore après avoir parcouru une distance plus ou moins longue. Elle se produit donc au moment même de l'application ou peu de temps après. La dérive est fonction de facteurs mécaniques (type de buse et pression qui conditionne la taille des gouttelettes, hauteur de pulvérisation,...), chimique (propriétés physico-chimiques de la bouillie) et climatiques (température, humidité relative et vitesse locale du vent) agissant en interaction.

Plusieurs méthodes de mesures de l'exposition des opérateurs aux produits phytosanitaires existent. Elles sont soit quantitatives (utilisation de patches, port d'un survêtement particulier susceptible de faire l'objet d'une analyse chimique, mesure sur les mains, utilisation d'un masque à cartouche qui collecte les particules et vapeurs inspirées, monitoring biologique consistant à réaliser des analyses biologiques des composés ou métabolites des excréctions salivaire, respiratoire, urinaire et sanguine), soit qualitatives (pulvérisation d'un traceur fluorescent couplé à une analyse d'images).

Par ailleurs, il existe des modèles permettant d'évaluer l'exposition (modèles déterministes et probabilistes). Les modèles déterministes, à savoir UK POEM, GERMAN model, DUTCH model et EUROPOEM reposent sur l'évaluation de la quantité de matière active absorbée par jour (mg s.a./kg/jour) et l'AOEL (**A**ceptable **O**perator **E**xposure **L**evel), quantité maximale de substance active à laquelle l'opérateur peut être exposé sans aucun effet. Ils fondent leur estimation sur le calcul d'une valeur de substitution. Celle-ci est variable en fonction des modèles considérés, qui prennent en compte à la fois des scénarios de traitement différents incluant le type de culture, de pulvérisateur, de formulation,... Selon les cas, la valeur de substitution est la moyenne géométrique, le 75<sup>ème</sup> percentile, le 90<sup>ème</sup> percentile, le cas extrême ou « worst case » de données expérimentales. Les limites des méthodes déterministes proviennent du fait qu'ils ne tiennent pas compte de l'incertitude de la variabilité dans l'évaluation du risque d'exposition. Les modèles probabilistes, comme ceux qui sont basés sur la méthode Monte Carlo, prennent en compte l'incertitude. Les limites des méthodes probabilistes sont la difficulté pour la prise de décision. Par exemple, doit-on se limiter à l'incertitude liée au modèle ou prendre en compte l'incertitude pour le processus de modélisation ?

# CHAPITRE 3 : L'APPLICATION DES PRODUITS PHYTOSANITAIRES AU SENEGAL

## 3.1 INTRODUCTION

Les produits phytosanitaires sont utilisés en quantités importantes en agriculture, pour lutter contre les organismes nuisibles. Chaque année, des dizaines de millions de litres d'insecticides sont épandus. Au Sénégal, l'agriculture utilise en moyenne, chaque année, 598 tonnes de pesticides solides et 1,3 millions de litres de pesticides liquides pour une valeur commerciale de 10,5 milliards de FCFA [PAN AFRICA, 2003]. Quelques 300 spécialités sont présentes dont 189 autorisées par le Comité Permanent Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel (CILSS).

Ce chapitre passe en revue la réglementation qui influence la gestion des pesticides au Sénégal. Ensuite, les quantités utilisées durant cette décennie et les circuits de distribution sont présentés. Enfin sont abordés les modes d'utilisation et les matières actives couramment rencontrées au Sénégal.

## 3.2 LA REGLEMENTATION

Elle concerne les lois, les conventions et accords internationaux et régionaux qui influencent la gestion des pesticides au Sénégal mais également, les dispositifs législatifs, réglementaires et institutionnels qui régissent le contrôle et la gestion des pesticides au niveau national.

### 3.2.1 La réglementation au niveau international

Le Sénégal a adhéré à de nombreux accords et conventions internationaux relatifs à la gestion des pesticides, parmi lesquels on peut citer la *Convention de Stockholm* sur les Polluants Organiques Persistants (POP), la *Convention de Bâle* sur la gestion des déchets (adhésion en 1992), le *Protocole de Montréal* relatif à la réglementation des substances

appauvrissant la couche d'ozone signé le 16 septembre 1987 et ratifié le 6 mai 1993, la *Convention sur la diversité biologique* signée le 13 juin 1992 et ratifiée le 17 octobre 1994, le *Code international de conduite de la FAO*<sup>2</sup>. Le Sénégal est aussi membre du *Codex Alimentarius* de la FAO/OMS. Les *Directives de Londres*, applicables à l'échange d'informations sur les produits chimiques dangereux qui font l'objet du commerce international et mises au point par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), ont abouti à l'établissement en 1989 de la *Procédure d'Information et de Consentement Préalable* (PIC) visant le contrôle de l'exportation et de l'importation des produits dangereux dont l'utilisation est déconseillée ou interdite. Cette procédure adoptée par l'ensemble des pays membres de la FAO et du PNUE, et ratifiée par le Sénégal, a abouti à l'adoption et à la mise en œuvre en 1998 de la *Convention de Rotterdam*.

Pour l'exportation des produits horticoles, les producteurs du Sénégal doivent respecter les normes (d'ordre réglementaire ou commercial). Afin de permettre aux entreprises ACP de se conformer aux exigences européennes en matière de qualité sanitaire et de traçabilité, l'Union Européenne a mis en place le Programme Initiative Pesticide (PIP). Le PIP permet également de consolider la place des petits producteurs dans la filière. Pour accompagner les producteurs dans l'application de ces normes, le PIP mène des actions de formation, d'information et de renforcement de capacités :

- le renforcement d'une démarche de qualité sanitaire dans le processus de production et de commercialisation ;
- la formation du personnel nécessaire à cette démarche et plus généralement à l'exercice de bonnes pratiques ;
- l'ajustement des itinéraires techniques de production (utilisation raisonnée de pesticides, recours à des alternatives non chimiques, etc.) ;
- la mise en place d'un système de traçabilité permettant de retrouver l'historique de la production et de l'exportation.

---

<sup>2</sup> Le code international de conduite de la FAO a été établi en raison des inquiétudes quant aux risques liés à la circulation des produits chimiques dangereux, en particulier dans les pays en développement où les dispositions législatives et réglementaires étaient peu opérationnelles.

### 3.2.2 La réglementation au niveau sous-régional

Au niveau sous-régional, le CILSS a opté depuis 1992 pour l'instauration d'un système commun d'homologation et de réglementation des pesticides pour ses pays membres. Le Comité Sahélien des Pesticides (CSP) basé à l'Institut du Sahel à Bamako est l'organe chargé de l'évaluation des dossiers d'homologation soumis par les firmes phytopharmaceutiques et octroie les autorisations de vente pour l'ensemble des Etats membres. Le CSP s'appuie sur l'ensemble des compétences existantes dans les Etats, ce qui permet de réaliser des économies d'échelle sur les coûts d'expérimentation et d'homologation. A défaut de l'homologation, le CSP peut délivrer des autorisations provisoires de vente (APV) selon les mêmes procédures pour une durée de trois ans. Jusqu'en 2002, le CSP avait délivré 198 autorisations provisoires de vente et 6 homologations [Niassy *et al.*, 2002]. D'autres initiatives déployées au niveau sous-régional et impliquant l'Union Monétaire Ouest Africaine (UEMOA) et la Communauté des Etats de l'Afrique de l'Ouest (CEDEAO), tendent à promouvoir l'extension de l'homologation commune aux autres pays de l'Afrique de l'Ouest et l'harmonisation des mesures non tarifaires dans le cadre de l'OMC/SPC.

### 3.2.3 La réglementation au niveau national

La réglementation au niveau national se résume en 3 étapes.

1. Avant les années 1980, seuls des arrêtés régissaient la gestion des pesticides au Sénégal. L'arrêté n° 04747 du 22-03-1971 ne réglementait que l'utilisation des emballages pour le conditionnement des pesticides agricoles formulés au Sénégal. Ensuite, de manière plus complète, l'arrêté interministériel n° 8322 du 07-08-1973 précise que les pesticides à usage agricole ou ménager ne peuvent être vendus que s'ils font l'objet d'un enregistrement.
2. A partir des années 1980, une législation plus complète est élaborée, en particulier sont promulgués la loi 84-15 du 02/02/1984 sur le contrôle des spécialités assimilées et le décret d'application 84-503 du 02/05/1984. Cette loi est plus exhaustive quant à la définition de la terminologie relative à ce qui est communément appelé «produit agropharmaceutique» et «spécialité agropharmaceutique», quant à la fixation des conditions de vente et de

distribution, ainsi qu'aux modalités d'agrément et de retrait des produits. De plus, une commission nationale d'agrément est instituée et est habilitée à émettre un avis en vue de la délivrance d'une autorisation administrative de vente par arrêté conjoint du Ministère de l'Agriculture et du Ministère de la Santé sur avis de la commission d'agrément. Cet agrément n'est cependant accordé qu'aux spécialités ayant fait la preuve de leur efficacité et de leur innocuité à l'égard de la santé publique, des cultures, des animaux domestiques et sauvages, et de l'environnement dans les conditions normales d'emploi. Cette loi est abrogée en 1992 lors de la création du CSP et un autre projet de loi relatif à la gestion des pesticides et des produits dangereux fixe les attributions du Comité National de Gestion des Produits Chimiques Dangereux (CNGPCD).

3. Il a fallu attendre 2001 pour que la loi 2001-01 du 15/01/2001 portant code de l'environnement intègre l'article L45 relatif au projet de création du CNGPCD. Il fait référence aux produits chimiques dangereux parmi lesquels les pesticides occupent une place importante. L'arrêté 852 du 08/02/2002 concrétise l'existence de ce comité qui se subdivise en deux commissions chargées respectivement de la gestion des pesticides et de la gestion des autres produits chimiques. De même, la création d'une troisième commission chargée de la toxicovigilance est envisagée. Le CNGPCD est l'organe chargé de l'application des décisions d'homologation du CSP. C'est en 2002, qu'une loi autorisant le Président de la République du Sénégal à ratifier l'accord portant « Réglementation Commune du CILSS » a été promulguée, consacrant ainsi sa mise en application effective.

Pour examiner en détail les dispositions législatives et réglementaires se rapportant à la gestion des pesticides en particulier, il faut se référer au document de projet de loi relatif à la gestion des pesticides et produits chimiques dangereux. L'examen des dispositions relatives au cycle de vie des pesticides conduit aux considérations suivantes.

### Expérimentation

Tout produit chimique dangereux destiné à des fins de recherche, d'analyse et d'expérimentation n'est pas concerné par cette loi, ce qui signifie que l'expérimentation échappe au processus de réglementation. Les firmes agrochimiques, en relation avec les sociétés de développement rural, lorsqu'elles ne mènent elles-mêmes leur propre expérimentation, soumettent leurs projets d'expérimentation à l'ISRA. Cette expérimentation porte sur l'efficacité biologique du pesticide et sur sa toxicité humaine. L'expérimentation est



nécessaire pour tous les pesticides soumis à la procédure d'homologation du CILSS. Il n'est plus indispensable de faire les tests dans tous les pays membres, puisqu'il existe déjà un système de reconnaissance mutuelle.

#### Production, Formulation

Les établissements de formulation, de fabrication, de vente en gros ou détail des pesticides doivent bénéficier d'une autorisation par arrêté conjoint des Ministres chargés de l'Agriculture, de la Santé et de l'Environnement sur proposition du CNGPCD. Les conditions d'obtention de l'autorisation sont fixées par arrêté des mêmes Ministres (article 12 du Chapitre 3 du projet de loi).

#### Agrément, Homologation et Autorisation de vente

Selon l'article 6 du Chapitre 3 du projet de loi, l'homologation délivrée par le CSP n'est définitive que si elle est approuvée par arrêté conjoint des Ministres chargés de l'Agriculture et de la Santé pour une période quinquennale après avis du CNGPCD.

#### Conditionnement et emballage

Selon l'article 9 du Chapitre 3 du projet de loi relatif à la gestion des pesticides et produits chimiques dangereux, tout pesticide homologué ou tout produit chimique dangereux agréé ou bénéficiant d'une autorisation provisoire de vente ne peut être importé et/ou vendu que dans son emballage d'origine hermétiquement scellé et correctement étiqueté.

#### Distribution et vente

Selon l'article 12 du Chapitre 3 du projet de loi, en matière de distribution et vente, il est prévu que les Ministres chargés de l'Agriculture, de la Santé et de l'Environnement établissent par arrêté conjoint, les autorisations de formulation, de fabrication et de vente en gros ou au détail des pesticides, sur proposition du CNGPCD.

#### Utilisation

La falsification et la mise en vente de produits périmés sont soumises à des peines d'amendes ou d'emprisonnement. Il en est de même pour ceux qui occasionneraient des intoxications collectives ou individuelles, des pollutions ou dégradations de l'environnement par des pesticides.

### Contrôle

Selon l'article 15 et 16 du Chapitre 4 relatif aux dispositions pénales, les agents assermentés des ministères chargés de l'Agriculture, de l'Environnement et de la Santé et tout autre agent assermenté et spécialement habilité sont chargés de la recherche et de la constatation des infractions à la loi. Ils peuvent procéder à la saisie éventuelle des pesticides non autorisés.

### Elimination

Il n'existe aucune mesure législative ou réglementaire relative à la destruction des stocks obsolètes. Cependant, les aspects relatifs à l'élimination des produits chimiques ont toujours été pris en charge par la Direction de la Protection des Végétaux (DPV), le Ministère de l'Environnement et les bailleurs de fonds.

### **3.2.4 Le dispositif institutionnel pour la gestion des pesticides**

Les institutions chargées de la mise en œuvre des mesures législatives et réglementaires sont la Direction de la Protection des Végétaux, la Direction de l'Environnement, la Direction de la Santé, la Direction de la Douane, la Direction du Commerce Extérieur. D'autres institutions telles que l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA), l'Agence Nationale de Conseil Agricole et Rural (ANCAR), les Ministères du Travail, de l'Industrie et de la Pêche ont également des prérogatives dans la gestion des pesticides. Pour pallier les conflits de compétences entre les différents intervenants, une charte de coordination interministérielle est en voie de création en vue d'harmoniser leurs actions afin de les rendre plus efficaces.

Le gouvernement du Sénégal dans son engagement à stimuler à l'échelle nationale l'investissement et le partenariat public-privé par l'innovation dans le secteur agricole à vocation commerciale a mis en place le PPMEH, le PDMAS. Le PIP appuie également la mise en place et le développement de task-forces en tant que mécanismes de concertation des opérateurs privés et le secteur public dans les pays ACP. Pour l'exportation des produits horticoles vers l'Europe, un Comité National de Suivi de la qualité intrinsèque a été mis en place sous la tutelle du Ministère de l'Agriculture. Ce comité sert de transmission entre les législations européennes et américaines d'une part et les professionnels de l'agro-

exportation d'autre part (information sur la liste des pesticides autorisés au Sénégal, les LMR européennes pour chaque culture, les exigences en matière de qualité).

### 3.3 L'UTILISATION DES PRODUITS PHYTOSANITAIRES AU SENEGAL

Les circuits de distribution sont nombreux et variés. Ils sont déterminés par le type de partenariat, la taille de l'exploitation et ses moyens financiers.

#### 3.3.1 Les importations

Les importations de matières actives et produits prêts à l'emploi sont effectuées par la DPV, le secteur privé et les ONG. Les pesticides importés sont de provenances diverses, mais on peut noter que l'essentiel vient des pays de l'Union Européenne (Allemagne, France, Grande-Bretagne, Hollande), des pays asiatiques (Chine, Inde, Japon), d'Israël et des Etats-Unis d'Amérique. La Figure 3.1 présente l'évolution des importations de pesticides de 1996 à 2005.

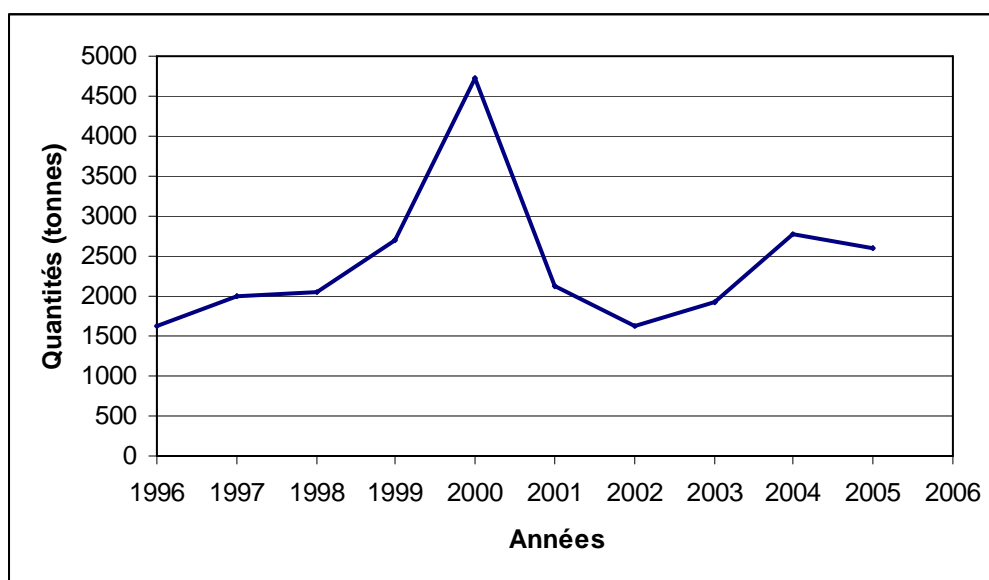


Figure 3.1. : Evolution des importations de pesticides au Sénégal (MEF/Direction de la Prévision et de la Statistique).

Les importations de pesticides évoluent de manière variable. De 1617 tonnes en 1996, les importations ont augmenté jusqu'en 2000 pour atteindre un maximum de 4732

tonnes. L'année 2000 a été une année où les importations ont été très importantes, vraisemblablement en raison de la part prise par les fongicides<sup>3</sup>. Pendant la période 2001-2002, les quantités importées ont fortement baissé. La tendance à la hausse semble reprendre à partir de 2003.

Dans les localités enclavées, l'approvisionnement des petits producteurs se fait dans les *loumas*, c'est-à-dire les marchés ruraux hebdomadaires. A ce niveau, les produits proviennent particulièrement des pays limitrophes (Guinée Bissau, Gambie, Mauritanie).

### **3.3.2 Les industries de pesticides au Sénégal**

Elles réalisent la formulation de matières actives importées et le conditionnement des produits déjà formulés. On en dénombre quatre au total, à savoir la SENCHIM et la SPIA qui formulent et conditionnent des produits à usage agricole tandis que les deux autres, SOCHIM et Valdafrique sont spécialisées dans les produits à usage d'hygiène publique et domestique (aérosols, liquides de pulvérisation, plaquettes et serpentins).

Avec la libéralisation et le vide juridique existant sur la fabrication et la commercialisation des produits phytosanitaires, on note une prolifération d'établissements commerciaux de produits agropharmaceutiques. Il s'agit essentiellement de grossistes et semi grossistes qui importent dans le but de reconditionner les produits avant de les introduire sur le marché par le biais de revendeurs qui souvent procèdent à leur tour à un autre reconditionnement, financièrement plus accessible pour les petits producteurs maraîchers mais extrêmement dangereux pour eux. Les vendeurs ambulants servent toujours de relais entre les points de vente et les localités éloignées.

### **3.3.3 Les circuits de distribution**

Quatre principaux circuits de distribution existent. (1) Le circuit non commercial est représenté par la DPV qui importe des produits finis prêts à l'emploi. Il y a également le Service National d'Hygiène et les ONG. (2) Le circuit des sociétés d'encadrement : celles-ci assistent les producteurs organisés pour la passation de marchés

---

<sup>3</sup> Selon la DPS, la part des fongicides dans les importations totales est de 57%.

d'appel d'offres et pour la livraison des commandes. Certaines sociétés comme la SODEFITEX en zone cotonnière offrent un système d'encadrement rapproché au sein duquel le produit est livré jusqu'au magasin de stockage puis au producteur. (3) Le circuit commercial formalisé : il s'agit des industriels, des grossistes et des détaillants ou revendeurs. Ils distribuent leurs produits sur base d'appel d'offre aux sociétés d'encadrement, groupements de producteurs. Ils ont développé un réseau de distribution représenté dans tout le pays. (4) Le circuit informel : c'est un réseau dense et diffus de distributeurs individuels qui s'est installé dans les zones d'intensification agricole, et particulièrement dans la zone des Niayes. Les risques liés à cette méthode de distribution sont importants du fait de la mauvaise qualité, de la mauvaise utilisation, du mauvais stockage et de l'absence de conseils adéquats.

### **3.3.4 Les méthodes d'application**

Au Sénégal, plusieurs modes d'utilisation sont observés dans le système de production en relation avec la taille de l'exploitation.

#### **3.3.4.1 L'utilisation par aspersion**

Elle est pratiquée par les maraîchers cultivant de petites surfaces. Elle consiste à traiter les attaques parasitaires à l'aide d'un seau contenant la solution de pesticides et de branchages comme aspersoir. Quand il s'agit de poudre, le saupoudrage à la main sans gants, ni masque de protection est pratiqué par les agriculteurs. Cette façon de traiter a été observée dans la grande Niaye de Pikine et dans la partie Nord, notamment dans le Gandiolais [Cissé *et al.*, 2001].

#### **3.3.4.2 Le traitement avec pulvérisateur à dos manuel ou à canne à pulvérisation centrifuge**

Le pulvérisateur manuel à dos est le type d'appareil le plus répandu dans les Niayes et dans le Delta du Sénégal. Il est appliqué aussi bien chez les petits que chez les moyens et grands exploitants. La canne à pulvérisation centrifuge est utilisée au Sénégal dans la zone cotonnière. Avec ces appareils, les risques ne sont pas les moindres dans la mesure où les équipements de protection individuelle font largement défaut. A cela, s'ajoute l'état des

appareils, les conditions atmosphériques durant les applications et le manque de formation des utilisateurs.

#### **3.3.4.3 Le traitement avec pulvérisateurs à dos motorisés**

Ils sont aussi très répandus dans les régions tropicales. Au Sénégal, ils sont utilisés que par certains exploitants moyens localisés dans les Niayes et dans le delta du fleuve Sénégal.

#### **3.3.4.4 Le traitement avec pulvérisateurs à grande capacité montés sur véhicule**

Ils existent mais ne sont pas à la portée de la majorité des utilisateurs.

#### **3.3.4.5 Le traitement par fert-irrigation**

Il est effectué en association avec l'irrigation au « goutte à goutte ». Dans ce système, les produits phytosanitaires et les engrais solubles sont directement injectés dans le système d'irrigation. Ce mode de traitement est exclusivement utilisé par les grands et quelques exploitants moyens. Il présente moins de risques pour les applicateurs mais, il n'est pas à la portée de la majorité des exploitants compte tenu des coûts d'investissement élevés.

### **3.3.5 Les produits utilisés**

Les 300 spécialités commerciales présentes au Sénégal sont constituées à partir d'environ 80 matières actives [PAN AFRICA, 2003]. Parmi elles, on rencontre différentes familles chimiques (carbamates, organophosphorés, organochlorés, les pyréthrinoïdes, etc.). Près de 12 produits utilisés sont identifiés comme hautement à modérément toxiques [Sow *et al.*, 2004] : il s'agit du carbofuran, l'endosulfan, le fenitrothion, le métamidophos, le chlorpyrifos, le diméthoate, le monocrotophos, le lindane, la deltaméthrine, l'ethropop, le methomyl et le parathion-ethyl. L'endosulfan est très largement utilisée dans la zone cotonnière.

L'exposition orale a provoqué de nombreux accidents mortels, chez les personnes et sur le bétail. Selon Boye [2002], une centaine de personnes seraient décédées entre 1973 et 2002 suite à une intoxication due aux pesticides, avec de grandes inégalités dans la répartition de ces intoxications qui revêtent souvent un caractère collectif. Par exemple, en 2000, seize personnes dans la région de Kolda ont trouvé la mort suite à une consommation de graines traitées au Spinox et au Granox (la matière active est le carbofuran). Aussi, en 1996 à Kabrousse, en 2000 à Sédhiou et à Kolda et en 2002 à Bignona, il a été noté l'apparition d'épidémies avec forte létalité. Les enquêtes épidémiologiques effectuées ont retenu comme cause, l'intoxication aux pesticides liée soit aux pratiques culturales ou à la conservation des récoltes, soit à une exposition toxique intra-domiciliaire. Actuellement, des stratégies sont envisagées pour la réduction des effets liés à l'utilisation des pesticides. Il s'agit de la lutte biologique, la gestion intégrée des prédateurs et de la production, la sensibilisation et le renforcement des capacités des intervenants.

### **3.4 CONCLUSION**

Les aspects sanitaires et environnementaux liés à l'utilisation des pesticides sont pris en compte au Sénégal grâce à son adhésion aux conventions et accords internationaux.

Dans le cadre de l'exportation des produits agricoles, les normes et directives sanitaires et phytosanitaires fixées par l'OMC et l'UE obligent le gouvernement à prendre d'importantes mesures au plan institutionnel afin de respecter les directives élaborées. D'autre part, dans la sous-région constituée des pays du Sahel, une prise de conscience des risques encourus par les populations et l'environnement a entraîné l'harmonisation de la législation et de la réglementation phytosanitaire.

Malgré l'importance du dispositif institutionnel et réglementaire dont dispose le Sénégal, il n'existe pas de dispositions pratiques et claires visant l'octroi d'autorisation préalable à l'importation des produits phytosanitaires. Les dispositions liées à la vente et à la distribution ne sont pas appliquées. Par ailleurs, des produits classés extrêmement toxiques pour l'homme et pour l'environnement sont quasiment passés sous silence par la législation phytosanitaire en vigueur (par exemple, des matières actives comme les organochlorés sont

toujours utilisées dans le pays). Les structures chargées de l'application de la réglementation ne disposent pas de moyens pour remplir correctement leurs fonctions.

Ces manquements au niveau de la réglementation et les quantités de produits manipulés (tonnage utilisé) peuvent servir d'indication et d'alarme. Cependant, l'estimation basée sur de tels indicateurs ne donne aucune information sur l'impact ni sur les effets.

Par conséquent d'autres mesures visant à évaluer et à quantifier le risque potentiel pour les êtres vivants et pour l'environnement doivent être entreprises. Ces aspects seront étudiés dans les chapitres qui suivent.



## CHAPITRE 4 : ANALYSE DES CONDITIONS D'APPLICATION DES PESTICIDES AU SENEGAL

### 4.1 INTRODUCTION

Une étude détaillée des procédures de traitement des cultures au Sénégal est réalisée, en ce qui concerne la zone maraîchère et la zone cotonnière. Elle se focalise sur les facteurs susceptibles de présenter des risques pour les opérateurs, à savoir, d'une part les appareils de traitement utilisés dont les composantes mécaniques peuvent présenter des défaillances ; d'autre part, sur les manipulations inappropriées du produit au moment de l'application et du stockage. Les paramètres pour estimer l'exposition de l'opérateur sont mesurés et un Equipement de Protection Individuel « Tropic EPI » fabriqué par la firme SYNGENTA est testé. Les avis des opérateurs sur certaines caractéristiques de cet équipement sont recueillis.

### 4.2 PRESENTATION DES ZONES D'ETUDE

Les zones concernées par ce travail sont la zone maraîchère, appelée zone des « *Niayes*<sup>4</sup> » (régions de Dakar et Thiés), et la zone cotonnière (région de Kolda, départements de Kolda et Vélingara), présentées dans la Figure 4.1.

---

<sup>4</sup> Les Niayes sont constitués de dépressions interdunaires caractérisées par des sols très humifères d'une faible profondeur, voire même un affleurement de la nappe phréatique.

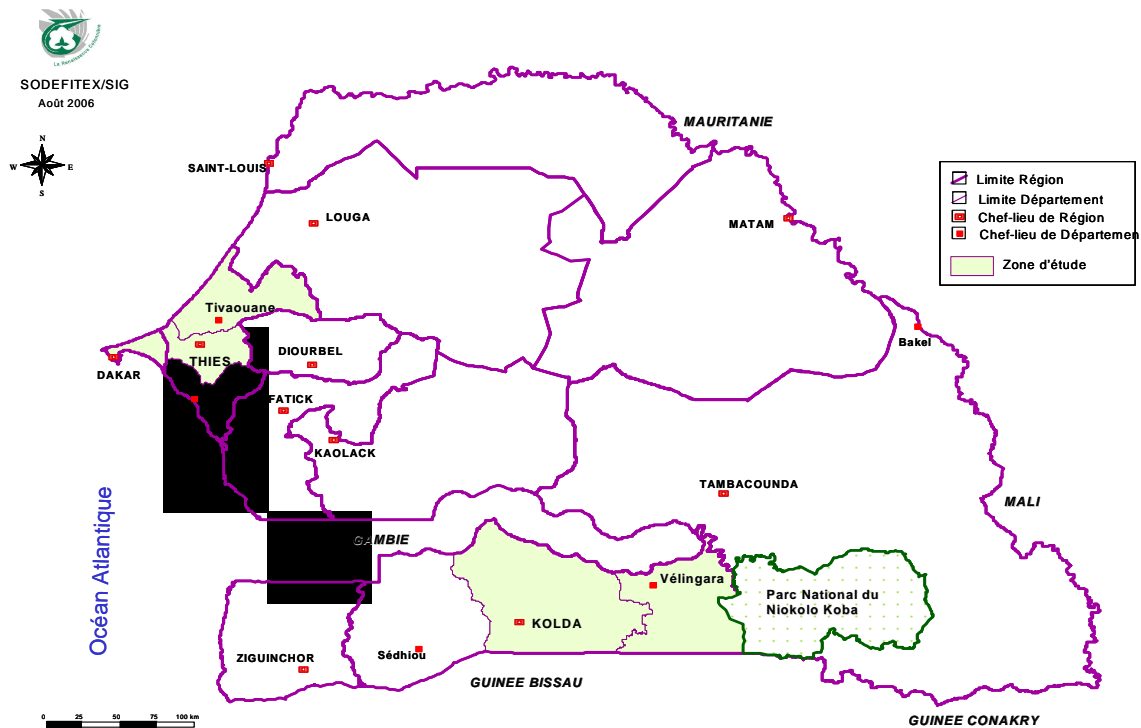


Figure 4.1. : Carte du Sénégal avec les zones de l'étude.

#### 4.2.1 La zone maraîchère

La zone des Niayes s'étend sur une bande limitée à l'Ouest par l'Océan Atlantique et longeant l'axe Dakar-Saint-Louis via les régions de Thiès et Louga. C'est la zone agro-écologique du Sénégal à vocation horticole par excellence qui fournit 80 % de la production horticole nationale [Ndoye *et al.*, 2002]. Cette vocation horticole lui est conférée par un certain nombre de particularités notamment son climat sub-canarien marqué par :

- une forte influence maritime ;
- des températures situées entre 22°C en janvier et 31°C en octobre et favorables aux productions horticoles car relativement douces comparées à celles observées dans le reste du pays ;
- une humidité relative variant entre 58 % en décembre et 83 % en août ;
- une pluviométrie oscillant du Nord au Sud entre 300 et 500 mm par an.

Son relief modelé par une succession de dunes sableuses et de dépressions.

Ses sols à texture dominante sablonneuse variant des types *Dior*<sup>5</sup>, *Deck Dior* à *Deck*<sup>6</sup> avec un degré dégressif de lessivage des argiles et une teneur en matières organiques et minérales généralement faible.

Sa végétation très clairsemée à dominante arbustive.

Son hydrographie marquée par la proximité de la nappe phréatique dans certaines zones et la présence de nombreux lacs et marigots dont la plupart ont évolué en cuvettes et en mares temporaires suite à la baisse de la pluviométrie.

Lors du recensement national agricole de 1998/99, la zone des *Niayes* comptait 35.000 ménages ruraux répartis dans 20.000 concessions et plus de 750 villages (RNA, 1998/99).

Les systèmes de production sont très diversifiés de par leur taille, leur degré d'intensification, les spéculations et la finalité de l'entreprise. Le secteur maraîcher se partage entre de petites exploitations traditionnelles (0,2 à 2 ha et 4 à 6 actifs) dispersées, à faible technicité, peu ou non encadrées ; des exploitations moyennes (2 à 20 ha) connaissant tous les degrés d'intensification ; le maraîchage industriel (plus de 20 ha) individuel ou collectif à fort niveau de technicité, destiné à la commercialisation (marché local ou exportation).

#### **4.2.2 La zone cotonnière**

La zone cotonnière située dans le tiers sud du Sénégal s'étend entre les 12<sup>ème</sup> et 14<sup>ème</sup> parallèles Nord de part et d'autre du fleuve Gambie. Elle occupe une superficie de 78 480 km<sup>2</sup> soit près de 46 % du territoire national, elle couvre administrativement :

- la région de Tambacounda exceptée la zone située au nord de l'axe de la voie ferrée Dakar-Kidira et l'arrondissement de Diawara ;
- les départements de Vélingara (périmètres de l'Anambé non compris) et
- Kolda ;
- Bounkiling, Diendé, Marsassoum, Tanaff qui sont du département de Sédhiou ;

---

<sup>5</sup> Dior est une terminologie locale des sols ferrugineux caractérisés par une texture composée essentiellement d'éléments sableux, parfois très pauvres en matière organique, d'où leur caractère filtrant.

<sup>6</sup> Deck est une terminologie locale des sols ferrugineux constitués d'alluvions sablo-argileux, caractérisés par une richesse en matière organique et azotés.

- une partie des régions de Kaolack (Nioro et Kounghel) et de Fatick (Sokone).

Pour améliorer l'efficacité de son intervention, la SODEFITEX a divisé l'aire cotonnière en quatre régions dites « régions SODEFITEX » : Tamba/Kahone, Kédougou, Vélingara et Kolda.

Le climat est de type soudano-sahélien à la frontière Nord gambienne et soudano-guinéenne aux confins du Sud-Est du pays. Deux grandes saisons peuvent y être décrites distinctement :

- la saison des pluies ou hivernage qui va de juin à octobre et qui dure 4 à 5 mois;
- la saison sèche qui s'étale de novembre à juin et qui dure 7 à 8 mois.

En fonction de la pluviométrie, on peut distinguer :

- une zone sahélo-soudanienne avec un hivernage de 90 à 120 jours, une pluviométrie moyenne de 600 mm/an et correspond à une partie de la région de Kaolack et Fatick et le Nord de la région de Tambacounda ;
- une zone soudanienne avec le département de Kédougou et la frange Sud des départements de Kolda et Vélingara avec une moyenne pluviométrique de 1000 mm par an.

Entre ces deux zones climatiques, nous avons une zone intermédiaire qui comprend le Sud de la région de Tambacounda et le Nord des régions de Vélingara et Kolda, avec une moyenne pluviométrique de 800 mm/an. La diversité climatique de l'aire cotonnière offre les conditions propices au développement des cultures pluviales qui ont une durée de cycle végétatif pouvant aller jusqu'à 150 jours. Le coton et l'arachide sont les cultures de rente pratiquées. La céréaliculture y est également présente avec le maïs, le riz, le mil et le sorgho. Cependant, malgré toutes ces potentialités culturelles, la zone cotonnière connaît des contraintes qui sont principalement le rétrécissement et l'irrégularité du cycle pluviométrique, l'enherbement, le parasitisme qui compromettent les productions végétales.

Les principaux types de sols rencontrés en zone cotonnière sont (i) les sols ferrugineux tropicaux lessivés de plateau, souvent gravillonnaires ou sableux à vocation pastorale, (ii) les sols de bas fond qui sont hydromorphes ou ferrugineux sur alluvions et colluvions de vallées et (iii) les sols minéraux bruts, produits des apports éoliens ou fluviaux,

généralement impropres à la culture. Ces différents sols, à cause de leur fragilité et de leur faible teneur en matière organique ont besoin de techniques ou de pratiques de conservation pour maintenir leur potentiel productif de manière durable. Ces types de sols sont les foyers de formations végétales diverses et variées.

Selon les données issues du recensement général de la population et de l'habitat au Sénégal en 1998/99, la zone cotonnière concentre 20 % de la population totale.

L'agriculture et l'élevage constituent les principales activités et les sources de revenus des populations les plus déterminantes. La production de coton est assurée par de petits producteurs exploitant en moyenne 0,6 ha/an de coton dans le cadre d'un assolement céréales- arachide-coton. La taille moyenne des exploitations cotonnières s'élève à 5,6 ha (4,3 ha à Vélingara et 7,2 ha au Sud Sine Saloum). Les systèmes de production, généralement extensifs, sont essentiellement de type polyculture-élevage dans le cadre d'exploitations agricoles familiales. En 2001/2002, le coton ne représentait en moyenne que 20 % des superficies cultivées dans les exploitations de la zone cotonnière contre 32 % pour l'arachide. Les céréales représentent en moyenne 46 % des superficies cultivées. Dans le Département de Vélingara, le coton occupe une place plus importante dans l'assolement avec 30 % des superficies cultivées.

## **4.3 MATERIELS ET METHODES**

### **4.3.1 Source de données**

Un travail de recherche bibliographique a permis d'avoir un aperçu sur les typologies des exploitations, selon plusieurs auteurs, dans les zones maraîchère et cotonnière au Sénégal.

Dans la zone maraîchère, on distingue 3 types d'exploitation selon la taille et le mode de mise en valeur [Fall Touré *et al.*, 2000].

Les petites exploitations : leur taille est inférieure à 1 ha. Il s'agit plutôt d'exploitations individuelles que familiales. Ce type d'exploitation est dominant sur toute la bande des

Niayes. Les cultures sont variées et essentiellement destinées à l'approvisionnement des marchés locaux.

Les moyennes exploitations : leur taille varie entre 1 et 20 ha. Ces exploitations sont privées. Elles sont de type moderne et semi moderne et font intervenir l'outil mécanique pour le travail de la terre, l'exhaure et l'irrigation et emploient des ouvriers agricoles. La production est essentiellement destinée aux marchés en gros et à l'exportation. Les principales cultures sont l'oignon, la tomate, l'haricot vert, le chou, l'aubergine, le poivron et le piment. Les petites et moyennes exploitations assurent à elles seules 80 % de la production maraîchère du pays [Konté *et al.*, 1995].

Les exploitations modernes : leur taille dépasse 50 ha et elles disposent des moyens techniques et humains parfois importantes. Elles sont privées ou à caractère associatif (GIE) et sont concentrées dans les régions de Dakar (Sébikotane), Thiés (Pout et Mboro) et Saint Louis. La production est constituée en majeure partie de cultures d'exportation (mangue, haricot vert, tomate cerise, melon) ; les surplus sont destinés à l'approvisionnement des marchés locaux.

Dans la zone cotonnière, une typologie effectuée par la SODEFITEX [Diop, 1991], cité par [Diao, 2002] avec comme principale caractéristique discriminante l'équipement agricole en traction animale a abouti à quatre types d'exploitation.

Le type A : il s'agit des exploitations ne disposant ni de matériel agricole, ni d'animal de trait.

Le type B : il correspond à des exploitations qui ont au moins un animal de trait sans matériel agricole ou un matériel agricole sans animal de trait.

Le type C : ce sont des exploitations ne pouvant travailler simultanément qu'avec un seul attelage (un animal de trait et plusieurs matériels ou plusieurs animaux de trait et un seul matériel).

Le type D : ces exploitations peuvent aligner simultanément au moins deux attelages (deux animaux de trait et plusieurs matériels agricoles ou plusieurs animaux de traits et deux matériels agricoles).

### **4.3.2 Le choix des sites**

Le facteur principal qui a guidé le choix de ces régions est leur forte implication dans les pratiques de traitement phytosanitaire. Près de 99 % des producteurs des *Niayes* font recours aux produits phytosanitaires [Ndoye *et al.*, 2004] et toutes les parcelles de coton sont traitées. Les autres facteurs dits secondaires de choix des sites sont : l'accessibilité de la zone et les facilités d'accès aux populations cibles offertes par la présence d'organisations socioprofessionnelles et de structures d'encadrement.

En zone cotonnière, nous avons choisi la région administrative de Kolda (régions cotonnières de Kolda et Vélingara) qui assure les 2/3 de la production de coton sur plan national (SODEFITEX). Tous les producteurs de coton appliquent les traitements insecticides.

En zone maraîchère, les travaux sont effectués dans les régions de Thiés et Dakar qui concentrent la majorité de la population et l'essentiel des activités maraîchères [Fall Touré *et al.*, 2000].

### **4.3.3 Mesures et observations suivies d'enquêtes complémentaires**

Les travaux de terrain ont débuté en 2005 par une phase préliminaire, constituée d'enquêtes et d'observations faites séparément. Environ 80 exploitants ont été enquêtés et la répartition en est la suivante : 30 dans la région de Thiés, 25 dans la région de Dakar et 25 dans la région de Kolda. En même temps, 11 mesures et observations ont été réalisées en zone maraîchère et 12 en zone cotonnière. Cependant, au vu des premiers résultats obtenus pendant cette phase préliminaire, on s'est rendu compte que les réponses fournies aux enquêtes étaient parfois contradictoires par rapport aux pratiques constatées.

De ce fait, une approche combinant des mesures et des observations de terrain suivie d'enquêtes a été adoptée en 2006. En outre, se basant sur les résultats de l'enquête préliminaire, le questionnaire a été revu pour mieux cadrer aux objectifs de l'étude. Les avantages de la méthode choisie sont multiples :

- elle est assez avantageuse en temps de réalisation et coûts de l'opération ;
- la personne suivie pendant l'application est questionnée à la fin des travaux, ce qui permet de contrôler la cohérence des réponses et si une contradiction se produit, on a le temps et la possibilité dans l'immédiat et, si nécessaire de demander des précisions.

#### 4.3.4 Echantillonnage

La précision des résultats obtenus à l'issue d'un travail d'observation/d'enquête par échantillonnage dépend à la fois de l'importance de l'échantillon et du caractère plus ou moins homogène ou hétérogène de la population parent. En zone cotonnière, les pratiques phytosanitaires (culture pratiquée, produits et volumes utilisés, appareils de traitement) sont homogènes chez les producteurs de coton, sous la supervision de la SODEFITEX qui assure la distribution des intrants, fixe le calendrier des applications, assure la supervision, l'encadrement et l'achat de la production. En zone maraîchère, même si les cultures pratiquées varient d'une exploitation à une autre, les appareils de traitement observés sont quasi-identiques (pulvérisateurs à dos).

L'échantillonnage des opérateurs observés dans cette enquête est aléatoire. Dans la zone maraîchère, nous avons choisi les opérateurs parmi les producteurs encadrés par l'ANCAR dans le cadre de la Gestion Intégrée des Produits et des Déprédateurs (76 exploitations répartis en 4 GIE), parmi les producteurs ayant bénéficiés des crédits de l'ex PPMEH (1296 exploitations) et parmi les producteurs de l'AGRICONCEPT. Dans la zone cotonnière (régions de Kolda et Vélingara), nous avons choisi au hasard des contacts des opérateurs dans 5 secteurs<sup>7</sup> sur les huit que comptent ces deux régions cotonnières.

Pour ce qui est de la taille de l'échantillon, elle est fixée en valeur absolue à un minimum de 100, soit 50 par zone d'étude. Cet échantillon semble suffisant pour estimer sur une base réaliste (représentative des traitements phytosanitaires) les risques d'exposition des opérateurs intervenant dans les zones d'application au Sénégal. Selon Anon [1997], Van Hemmen [2001] cités par Thielen [2002], la mise en route du modèle EUROPOEM II ne sera

---

<sup>7</sup> Le secteur est une subdivision de la région cotonnière. Il est constitué d'un ensemble de centres d'encadrement polarisant chacun plusieurs villages.



possible qu'à partir d'un minimum de 15 à 20 données. Entre 50 à 100 données, l'échantillon sera considéré comme large et s'il compte plus de 100 données, l'échantillon sera considéré suffisamment large.

En zone maraîchère :

- au total, 54 opérateurs ont fait objet d'enquête, de mesures et d'observations pendant le traitement (dont 43 l'année 2006 et 11 en 2005). Parmi ceux-ci, 24 travaillent sur de moyennes à grandes exploitations (> 1 ha), et 30 sur de petites exploitations (< 1 ha) ;
- les 43 opérateurs de 2006 ont répondu au questionnaire ;
- parmi ces 43 opérateurs, 20 ont participé au « Test de confort et d'acceptabilité de l'EPI (de SYNGENTA) ».

En zone cotonnière :

- au total les mesures et observations ont porté sur 62 opérateurs (50 en année 2006 dans la région cotonnière de Vélingara et 12 en 2005 dans la région de Kolda) ;
- les 50 opérateurs de 2006 ont répondu au questionnaire ;
- parmi ces 50 opérateurs, 20 ont participé au « Test de confort et d'acceptabilité de l'EPI (de SYNGENTA) ».

L'unité de base est l'opérateur qui applique le traitement phytosanitaire et les observations sont faites au champ au moment de l'application. Pendant les applications phytosanitaires, deux types de matériels de traitement sont principalement utilisés.

- Le pulvérisateur à dos (en zone maraîchère) : il est le type d'appareil le plus répandu au Sénégal et surtout chez les petits producteurs. Il comporte 3 principaux éléments : le circuit liquide, l'organe de mise sous pression et la lance terminée par une buse.
- La canne à disque à pulvérisation centrifuge (en zone cotonnière) : pour ce type d'appareil, le produit utilisé est une formulation liquide utilisée à raison de 1 à 4 l/ha (ultra bas volume) ou dilué dans un faible volume d'eau à raison de 10 à 20 l/ha (très bas volume).

Les deux appareils de traitement utilisés dans cette étude seront présentés beaucoup plus en détail dans le chapitre 5.

#### **4.3.5 Mesures et observations de terrain**

Pour limiter autant que possible une influence quelconque sur le comportement de l'applicateur, l'observateur reste discret et ne participe pas aux manipulations. Les étapes du travail sont :

- prise de contact et explications sur les objectifs de la visite à l'arrivée sur les lieux ;
- visite du local de stockage des produits soit avant ou après les observations ;
- observations de la préparation de la bouillie et mesure du temps ;
- observations du matériel de pulvérisation ;
- estimation des surfaces traitées et volumes appliqués ;
- observations après le traitement ;
- mesures des paramètres temps, vitesse, hauteur d'application, débits des buses, météorologie, etc.

Les mesures effectuées sont les suivantes.

##### Temps de préparation

On chronomètre le temps mis par l'applicateur pour préparer et charger la bouillie de pulvérisation. Le chronométrage démarre dès l'instant où l'applicateur prend le conditionnement et se termine juste après le chargement du pulvérisateur et parfois au moment où les mains sont essuyées (Figure 4.2.). La préparation se fait soit directement dans le pulvérisateur soit dans des fûts avant d'être versée dans le pulvérisateur. La mesure est répétée chaque fois que l'applicateur recommence une nouvelle préparation pour le chargement de la cuve. La somme des mesures de tous les chargements réalisés donne le temps de préparation.



*Figure 4.2. : Photos de préparation de la bouillie sur le terrain.*

### Temps d'application

On mesure le temps mis par l'applicateur pour traiter la parcelle (Figure 4.3.). Donc le chronomètre n'est en mode fonction qu'au moment de la pulvérisation. Les pauses ne sont pas prises en compte. A la fin du traitement, les temps mesurés pour appliquer les chargements de cuve effectués sont sommés.



*Figure 4.3. : Observateur chronométrant le temps d'application.*

### Temps de rinçage (Tr)

Ce paramètre est également mesuré par simple chronométrage. On mesure juste le temps mis par l'applicateur, après le traitement, pour rincer les appareils de traitement utilisés, et les accessoires utilisés pour le mélange et le traitement (Figure 4.4.).



*Figure 4.4. : Rinçage d'un pulvérisateur après l'application.*

#### Vitesse d'avancement (v)

On mesure par chronomètre le temps mis par l'applicateur pour parcourir une distance donnée.

$$v = \text{distance/temps}$$

#### Volume appliqué

C'est la quantité de bouillie appliquée sur la superficie traitée. Chaque remplissage de la cuve donne une idée du volume appliqué pour le chargement. Le nombre de chargements de cuve réalisés multiplié par le volume de chaque chargement donne le volume appliqué sur la superficie traitée. Le volume mort (les restants du fond de la cuve et dans la tuyauterie du pulvérisateur) n'a pas été pris en compte dans ce travail.

#### La hauteur de pulvérisation

Elle est mesurée par rapport à la hauteur de la culture traitée en pulvérisation à dos. Pour la canne centrifuge, c'est la hauteur qui sépare le centre du disque du pulvérisateur porté par l'applicateur et le sol (Figure 4.5.).



Figure 4.5. : Hauteurs de pulvérisation en pulvérisation à dos et à la canne centrifuge.

### Débit de la buse

Pour un pulvérisateur à dos à pression entretenue, le débit est mesuré à l'aide d'un chronomètre et d'un récipient gradué. Le procédé consiste à pulvériser dans le récipient gradué et en actionnant le levier du pulvérisateur régulièrement pendant une durée d'une minute.

$$q = \text{volume} / \text{temps}$$

### Largeur de travail

On pulvérise la bouillie sur sol nu à la hauteur de travail et, à partir de l'empreinte du jet laissé au sol, on mesure cette largeur.