



Version finale, 28.4.2025, à l'attention du Service de la santé publique du canton du Valais

Exposition aux Pesticides par l'Air et Santé Respiratoire des Écoliers en VALais (PARVAL)

Synthèse des principaux résultats et recommandations

Auteurs: Lucienne Zinsstag, Anouk Petitpierre, Aline Berweger, Noémie Pidoux, Christine Dalla Pola, Dr Medea Imboden, PD Dr Christian Schindler, Prof. Nicole Probst Hensch, Prof. Samuel Fuhrmann*

Contacts:

* Coordination de projet:

Institut Tropical et de Santé Publique Suisse

Kreuzstrasse 2

4123 Allschwil

Suisse

www.swisstph.ch/fr/

Prof. Samuel Fuhrmann

Epidemiology and Public Health

Group Leader: Agricultural Health Group

Tél.: +41 61 284 86 19

E-mail: samuel.fuhrmann@swisstph.ch

Sources de financement du projet:

Service de la santé publique, Valais

Avenue de la Gare 23

1950 Sion

Suisse

<https://www.vs.ch/fr/web/ssp>

SNSF Starting Grant du Fonds national

suisse (FNS) (référence subvention

TMSGI3_211325)

Appel à projets collaboratifs entre le FNS, le

NRF et le FORMAS pour accélérer la

réalisation des Objectifs de développement

durable (ODD) (référence subvention

40CF40_221709).

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières	2
Synthèse	3
Introduction.....	5
Méthode générale.....	6
Plan d'étude et sélection des participants	6
Collecte de données	7
Caractéristiques de la population étudiée	9
Résultats	11
À quels pesticides les enfants participant à l'étude sont-ils exposés par le biais de l'air?... 11	
Quels sont les facteurs de risque potentiels d'une exposition à des pesticides spécifiques et à des intensités différentes?	14
Existe-t-il une corrélation entre la concentration de pesticides mesurée et les symptômes respiratoires aigus?	15
Existe-t-il une corrélation entre la concentration de pesticides mesurée et des modifications de la fonction pulmonaire?	16
Discussion	16
À quels pesticides les enfants sont-ils exposés par le biais de l'air?	17
Quels sont les facteurs de risque potentiels d'une exposition à des pesticides spécifiques et à des intensités différentes?	18
Existe-t-il une corrélation entre les pesticides mesurés et les symptômes respiratoires aigus signalés?	19
Existe-t-il une corrélation entre les pesticides mesurés et les modifications de la fonction pulmonaire?	19
Recommandations.....	20
Financement.....	22
Déclaration d'intérêt.....	22
Références	22

SYNTHÈSE

Introduction

La présente étude a été motivée par les inquiétudes concernant les risques potentiels pour la santé respiratoire liés aux pesticides utilisés dans les zones agricoles. En 2023, le Service de la santé publique du canton du Valais a chargé l'Institut Tropical et de Santé Publique Suisse (Swiss TPH) d'élaborer et de mener à bien l'étude PARVAL afin d'explorer l'association à court terme entre l'exposition aux pesticides et la santé respiratoire (symptômes, mesures de la fonction pulmonaire) chez les élèves d'école primaire vivant à proximité de vignobles et de vergers dans le canton du Valais en Suisse. L'étude permettait de distinguer entre les effets bien connus de la pollution atmosphérique et du pollen sur la santé respiratoire, et ceux relevant de l'exposition aux pesticides, qui sont moins bien compris.

Déroulement de l'étude

L'étude a examiné les cas de 206 enfants âgés de 6 à 13 ans et scolarisés dans trois écoles de la région du Valais, caractérisée par différentes activités agricoles (principalement des vignobles à Salquenen et Chamoson, et des vignobles et des vergers à Saxon). Lors de quatre évaluations qui se sont déroulées de janvier (saison sans pulvérisation de pesticides) à avril, mai et juin 2024 (saison avec pulvérisation), l'équipe de recherche a collecté des données d'exposition aux pesticides (en accordant la priorité aux pesticides courants ayant des effets supposés sur la santé respiratoire). Les enfants ont porté des bracelets en silicone et fourni des échantillons d'urine afin d'évaluer l'exposition à 83 fongicides, insecticides et herbicides différents (représentant 60% des pesticides potentiellement irritants des voies respiratoires vendus en Suisse en 2020). Leur fonction pulmonaire a également été testée à l'aide d'un spiromètre portable. Les parents ont répondu à des questionnaires sur la santé respiratoire de leurs enfants, les antécédents résidentiels et d'autres facteurs de risque.

Principaux résultats

Les résultats ont révélé une exposition étendue des enfants à des pesticides uniques et à des mélanges de pesticides. Sur les 81 pesticides analysés, 36 ont été détectés dans les bracelets, et les deux biomarqueurs analysés dans l'urine ont également été détectés. En moyenne, les enfants ont été exposés à 14 pesticides différents au cours des quatre phases d'évaluation. Pour la plupart des pesticides, leur présence dans les bracelets s'est avérée plus élevée d'avril à juin 2024 (période de pulvérisation) qu'en janvier 2024 (période sans pulvérisation). Ce constat concerne tout particulièrement les enfants vivant à proximité de vignobles et de vergers. L'exposition des enfants aux pesticides était variable selon les communes, et ce résultat dépend probablement des différents types de cultures et de la quantité de pesticides utilisée.

Aucune association n'a été relevée entre l'exposition des enfants aux pesticides et des symptômes respiratoires tels que la toux ou les difficultés respiratoires. L'étude a souligné la baisse légère de certaines valeurs mesurées de la fonction pulmonaire en lien avec des pesticides uniques, mais ces corrélations étaient très fluctuantes et dépendantes de la méthode statistique utilisée.

Conclusion

Les pesticides pulvérisés dans les vignobles et les vergers situés à proximité des domiciles des enfants constituent un facteur aggravant de leur exposition aux pesticides. L'étude n'a pas démontré que l'exposition aux pesticides est associée à des symptômes respiratoires graves à court terme. Des études plus vastes sont nécessaires pour confirmer les faibles effets à court terme de pesticides spécifiques sur la fonction pulmonaire. Elles devraient également examiner les effets des mélanges de pesticides et les effets à long terme.

Dans le cadre d'une stratégie de réduction des risques, les résultats soulignent l'importance d'une surveillance continue des pesticides, d'une surveillance sanitaire et de mesures de précaution pour préserver la santé des enfants. Il est essentiel de mener des recherches à plus long terme et d'inclure des panels plus vastes de participants afin de mieux déterminer le degré d'exposition aux pesticides et les effets généraux potentiels sur la santé de diverses populations. Une étude sur le long terme qui regroupe 100 000 enfants et adultes vivant en Suisse est en cours de développement sous la direction de l'Office fédéral de la santé publique et de la communauté suisse de recherche en santé publique. Cette étude permettrait d'assurer une surveillance plus que nécessaire de l'exposition humaine aux produits chimiques et de la santé.

Recommandations pour réduire l'exposition aux pesticides

Afin de réduire l'exposition aux pesticides, il est conseillé aux agriculteurs et agricultrices d'adopter des techniques de pulvérisation de pointe et de réduire la dérive de pulvérisation tout en respectant les directives d'application mentionnées sur l'étiquette du produit (p. ex. vitesse du vent, zones tampons). Les parents exposés aux pesticides dans le cadre de leur activité professionnelle doivent éviter de ramener à leur domicile des vêtements susceptibles de contenir des poussières de pesticides. Les résultats de la présente étude pourraient permettre d'amorcer le dialogue, par exemple lors d'événements d'information, entre les agriculteurs et les agricultrices, les agences gouvernementales et les communautés concernées. Les différentes parties auraient alors l'occasion de partager des informations sur la pulvérisation de pesticides, de promouvoir la compréhension des risques et des avantages potentiels, et de discuter des stratégies visant à réduire l'exposition. Les autorités devraient mettre en place et soutenir des programmes de surveillance de l'exposition à long terme aux pesticides et de leurs effets sur la santé.

INTRODUCTION

Les populations vivant à proximité de terres agricoles sont exposées aux pesticides de diverses manières, par le biais de la dérive de pesticides dans l'air, des résidus présents sur les vêtements et rapportés au domicile, ou encore de la nourriture qu'elles consomment (Hyland & Laribi, 2017). Cette exposition peut nuire à la santé respiratoire, et notamment à celle des groupes de personnes vulnérables, comme les enfants (Gilden et al., 2023). En Suisse, 206 pesticides différents ont été vendus à des fins agricoles en 2023 (BLW, 2023), contre 239 en 2020, traduisant ainsi une progression de la réduction des pesticides utilisés dans le pays (BLW, 2024). Les vignobles et les vergers sont les plus gros utilisateurs de pesticides, avec environ 25 kg par hectare et par an (BLW, 2024). Toutefois, la quantité et le type de pesticides utilisés varient en fonction de l'exploitation, de la méthode agricole (p. ex. agriculture conventionnelle/biologique), des cultures et de la région, car les divers organismes nuisibles aux cultures affectent des zones différentes. Il est primordial de suivre l'exposition aux pesticides dans des régions spécifiques, car nous ne comprenons pas entièrement l'ampleur de l'exposition des populations vivant dans des zones agricoles, ni les effets possibles sur la santé, tels que les problèmes respiratoires (Van Horne et al., 2022). En Suisse, 1) les données sur l'exposition aux pesticides sont très rares et 2) il n'existe pas de données sur les effets des pesticides sur la santé humaine, notamment parce qu'il n'y a pas assez de programmes de suivi des pesticides au sein de la population (Probst-Hensch et al., 2022). Cette absence de données complique la prise de décisions éclairées en matière de réglementation des pesticides, l'amélioration des mesures de sécurité et la mise en œuvre du «Plan d'action national Produits phytosanitaires» (BLW, 2017).

En Valais, une région suisse connue pour ses vignobles et ses vergers, l'opinion publique s'inquiète de l'exposition aux pesticides en suspension dans l'air et de ses effets potentiels sur la santé respiratoire des enfants. En effet, des études environnementales menées en 2020 sur les pluies et l'air à proximité des zones agricoles en Valais ont détecté plusieurs pesticides irritants pour le système respiratoire (p. ex. les fongicides cyprodinil, diméthomorphe, propiconazole, tébuconazole ou les herbicides diuron, terbuthylazine et 2,4-D) (BAFU, 2022; Carbotech, 2021; Lewis et al., 2016). Cependant, aucune étude n'a encore évalué en Suisse l'exposition aux pesticides ou les risques pour la santé des personnes résidant à proximité de zones agricoles.

En 2023, le Service de la santé publique du canton du Valais a chargé l'Institut Tropical et de Santé Publique Suisse (Swiss TPH) d'évaluer les modes d'exposition aux pesticides et d'examiner leur impact potentiel sur la santé respiratoire (infections respiratoires aiguës) d'élèves d'école primaire vivant à proximité de vignobles et de vergers. Des recommandations sont formulées à la fin de ce rapport et ont été établies à partir des résultats de la présente étude et de l'expertise de l'équipe de recherche. Cette étude, menée entre le 8.1.2024 et le 31.12.2024, avait deux objectifs majeurs et visait à répondre à quatre principales questions de recherche:

Premier objectif: mesurer l'exposition aux pesticides en suspension dans l'air d'élèves d'école primaire vivant à proximité de vignobles et de vergers.

Questions clés:

1. À quels pesticides les enfants sont-ils exposés par le biais de l'air?
2. Quels sont les facteurs prédictifs de l'exposition des enfants aux pesticides en suspension dans l'air à proximité des vignobles et des vergers?

Deuxième objectif: évaluer la manière dont l'exposition aux pesticides en suspension dans l'air affecte la santé respiratoire des enfants au cours de différentes saisons, y compris les symptômes respiratoires et la fonction pulmonaire, tout en tenant compte de l'influence du pollen et de la pollution atmosphérique.

Questions clés:

3. L'exposition aux pesticides en suspension dans l'air a-t-elle un lien avec les symptômes respiratoires des enfants signalés par les parents?
4. L'exposition aux pesticides en suspension dans l'air est-elle associée à une diminution de la fonction pulmonaire?

En outre, et principalement suite aux résultats de la présente étude, le Service de la santé publique du canton du Valais a chargé Swiss TPH de formuler des recommandations pour réduire, si nécessaire, l'exposition aux pesticides en suspension dans l'air des enfants vivant à proximité de vignobles et de vergers, et, le cas échéant, à atténuer leurs effets sur la santé de ces enfants.

MÉTHODE GÉNÉRALE

Plan d'étude et sélection des participants

L'étude a examiné l'exposition aux pesticides en suspension dans l'air et la santé respiratoire d'élèves des **degrés primaires 3H à 8H**. **L'étude a été menée** au sein des trois écoles primaires des communes de Chamoson, Saxon et Salquenen dans le canton du Valais, en Suisse (**Illustration 1**). Ces trois écoles ont été sélectionnées parmi un panel de 145 écoles primaires dans le canton du Valais du fait de la densité élevée de vignobles et de vergers dans un rayon d'un kilomètre. L'étude a ciblé la totalité des 785 élèves de ces trois écoles primaires. Suite à l'approbation éthique par la Commission cantonale d'éthique de la recherche sur l'être humain (CER-VD) obtenue le 16 novembre 2023, les élèves ont rejoint l'étude entre novembre et décembre 2023. La collecte des données s'est déroulée au cours de quatre évaluations: une évaluation de référence (B) lors de la saison sans pulvérisation (du 8 janvier au 9 février 2024), et trois évaluations de suivi (A1-A3) pendant la saison de pulvérisation de pesticides (du 8 avril au 21 juin 2024) (**Illustration 2**).

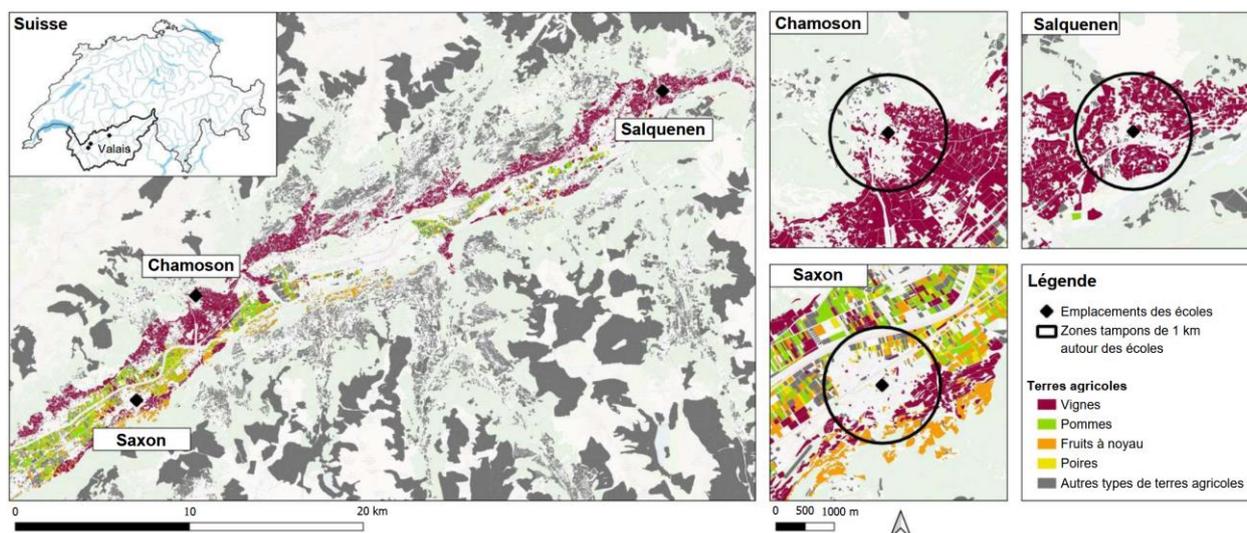


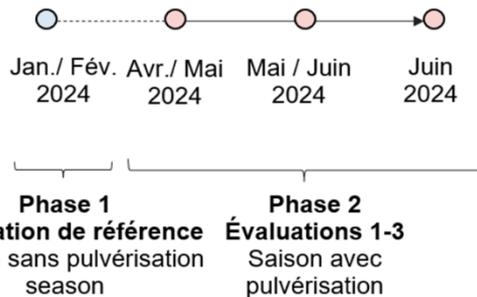
Illustration 1: Carte situant les trois villages de Saxon, Chamoson et Salquenen, ainsi que les écoles sélectionnées et les terres agricoles à proximité, y compris les vignobles et les vergers.

Collecte de données

Après chacune des quatre évaluations, les parents des élèves participant à l'étude ont rempli un questionnaire en ligne (**Illustration 2**). Les questions portaient sur le contexte familial, le lieu de résidence, toute exposition éventuelle aux pesticides (p. ex. utilisation observée de pesticides, applications domestiques) et sur la santé respiratoire des enfants. Les questions relatives à la santé s'inspiraient du questionnaire d'une étude bien connue sur l'asthme et les allergies, intitulée *International Study of Asthma and Allergies in Childhood (ISAAC)* (Asher et al., 1995; Braun-Fahrländer et al., 1997). 206 enfants sélectionnés de manière aléatoire ont été soumis à des tests plus approfondis lors de chaque évaluation afin de mesurer l'exposition aux pesticides et de contrôler leur santé respiratoire. Ces tests ont intégré les étapes suivantes (présentées dans l'**Illustration 1**):

- **Exposition aux pesticides:** les enfants ont porté des bracelets en silicone pendant la semaine d'évaluation afin de mesurer l'exposition aux pesticides (Fuhrimann et al., 2021). À la fin de chaque semaine (jour 8), des échantillons d'urine ont été collectés afin de tester deux biomarqueurs de pesticides ne pouvant être détectés avec les bracelets (Norén et al., 2020).
- **Fonction pulmonaire:** les enfants ont utilisé un spiromètre pour mesurer leur fonction pulmonaire (MIR, 2019). Les mesures ont été effectuées sous la supervision d'une chercheuse ou d'un chercheur qualifié à l'école lors des jours 1 et 8, et sous la supervision des parents au domicile le soir (de 18 h à 21 h; les résultats ne sont pas intégrés au présent rapport, car ils font partie d'une étude doctorale ultérieure).
- **Taille et poids:** la taille et le poids des enfants ont été relevés le jour 1 de chaque phase d'évaluation.
- **Pollution atmosphérique et pollen:** les données ont été collectées auprès des stations de surveillance existantes.

(a) Évaluations



(b)

Semaine de mesure	Total n= 206	Jour 1	Jour 2-7	Jour 8	Éléments analysés
Questionnaire en ligne des parents					<ul style="list-style-type: none"> • Symptômes respiratoires aigus • Données sociodémographiques • Exposition aux pesticides déclarée par les parents
Bracelets	Individuel n=206				81 pesticides ciblés [ng/g] Mesure de départ Jour 1, mesure finale Jour 8
	Stationnaire au domicile n=52 à l'école n=3				
Échantillon d'urine ponctuel					2 biomarqueurs de pesticides ciblés [ng/ml]
Test de spirométrie	Supervisé à l'école				Fonction pulmonaire <ul style="list-style-type: none"> • VEMS₁ [L/s] • CVF [L] • DEF₂₅₋₇₅ [L/s] • DEP [L/s]
	Non supervisé à domicile (données non incluses dans ce rapport)				
Données anthropométriques					Taille [cm] Poids [kg]

Illustration 2: (a) Calendrier de l'étude, y compris le nombre total d'enfants intégrés à l'analyse (n = 206) et les deux phases (saison sans pulvérisation et saison de pulvérisation), soit un total de quatre périodes d'évaluation. **(b)** Valeurs relevées chez les enfants lors de mesures approfondies.

Méthode de sélection et de mesure des pesticides:

Au total, 81 pesticides et deux biomarqueurs urinaires ont été sélectionnés pour être analysés dans les bracelets et les échantillons d'urine. Le processus de sélection a suivi une approche progressive basée sur les critères suivants (**Illustration 3**):

- **Disponibilité sur le marché:** pesticides vendus en Suisse en 2020 et les plus utilisés jusqu'à aujourd'hui (BLW, 2023).
- **Pertinence pour la santé respiratoire:** pesticides à l'effet irritant sur le système respiratoire connu ou suspecté, et pesticides aux données toxicologiques manquantes dans la base de données Pesticides Properties Database (Lewis et al., 2016).
- **Faisabilité analytique:** pesticides pouvant être détectés avec fiabilité à l'aide des méthodes analytiques disponibles.

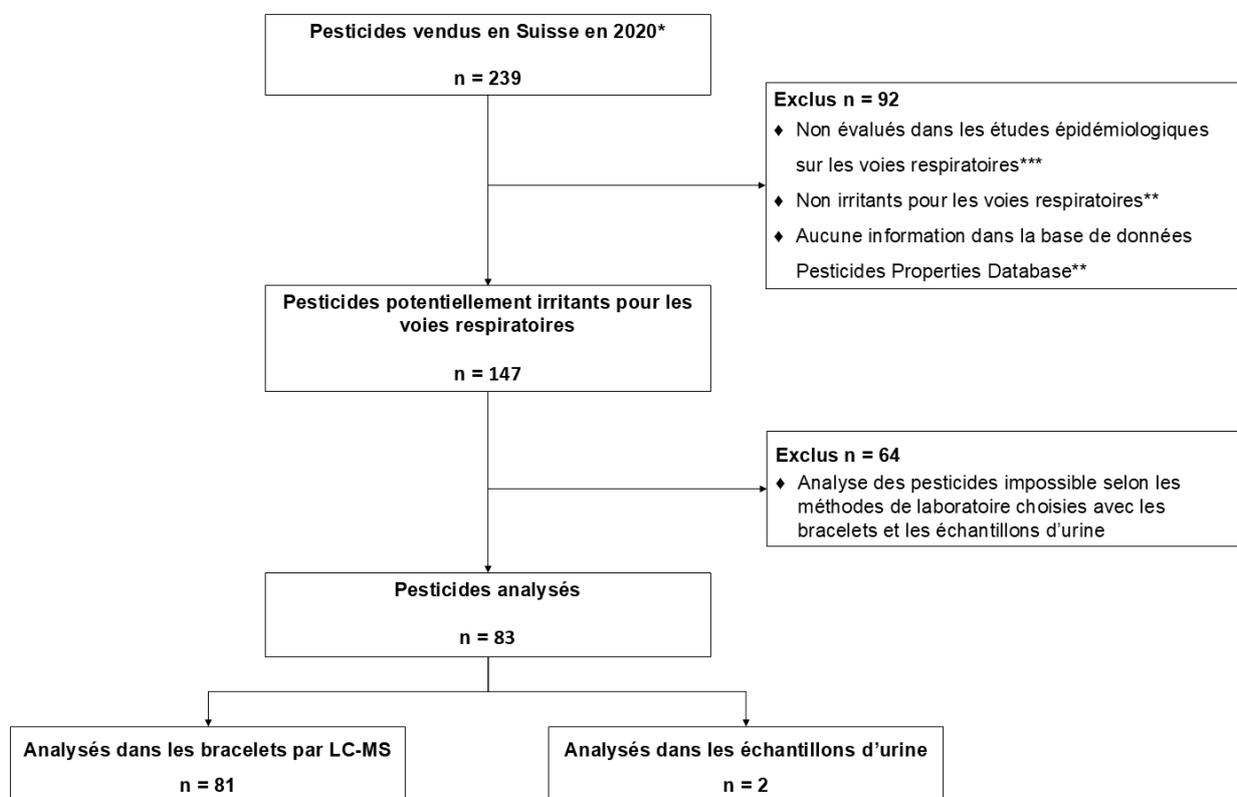


Illustration 3: Logigramme illustrant la sélection des pesticides ciblés pour l'analyse avec les bracelets et les échantillons d'urine, et détaillant les étapes séquentielles et les critères appliqués à chaque stade. * Les pesticides ciblés ont été sélectionnés à partir des données disponibles les plus récentes (2020) au moment de la sélection (BLW, 2023). ** Selon la base de données Pesticides Properties Database (PPDB, Lewis et al., 2016). *** (Raheison et al., 2019; Yang et al., 2023, p. 20).

Alors que notre étude couvre près de 60% des pesticides potentiellement irritants des voies respiratoires vendus en Suisse en 2020, plusieurs pesticides principaux tels que les pyréthrinoides (Arcury et al., 2021; Islam et al., 2023; Lee et al., 2022), le soufre (Raanan et al., 2017), le cuivre, le folpel et le captane (Galea et al., 2015; Lewis et al., 2016), n'ont pas été inclus en raison de restrictions du matériel d'échantillonnage ou des méthodes d'analyse. Par exemple, les bracelets et les échantillons d'urine ne permettent pas de détecter efficacement l'exposition excessive au cuivre et au soufre, tandis que les limites de détection élevées des méthodes

existantes pour le folpel et le captane rendent difficile la mesure des faibles niveaux attendus pour les populations riveraines des dérives de pulvérisation. L'exposition aux pyréthriinoïdes est mesurée dans l'urine et sera présentée séparément sous peu.

Mesures à partir des bracelets en silicone:

- Les bracelets ont détecté des pesticides dans l'air entourant les enfants. Ils permettent d'estimer l'exposition hebdomadaire totale aux pesticides des enfants, soit par inhalation lors de la respiration de l'air, soit par absorption lors du contact direct avec leur peau (Fuhrimann et al., 2021).
- Les bracelets en silicone portés par les enfants ont été testés par un laboratoire de recherches de l'Université de Wageningue aux Pays-Bas, afin de déterminer l'exposition aux pesticides (Wageningen Food Safety Research, 2019).

Mesures à partir des échantillons d'urine:

- L'ajout d'échantillons d'urine à l'analyse des bracelets a permis une évaluation plus complète de l'exposition totale des enfants à court terme, y compris via l'air et les aliments. Il a également permis de mieux comprendre l'exposition des enfants aux produits chimiques présents dans l'environnement.
- Les échantillons d'urine ont été testés à l'Université de Lund en Suède (Applied Mass Spectrometry in Environmental Medicine | Lund University, 2024).

Caractéristiques de la population étudiée

Sur les 785 enfants invités à participer à l'étude (Illustration 4), 273 parents ont rempli le questionnaire, soit un taux de participation de 35%. Parmi eux, 206 enfants ont été sélectionnés de manière aléatoire pour réaliser des tests approfondis (99 de Saxon, 77 de Chamoson et 30 de Salquenen). Toutes les analyses du présent document reposent sur les informations recueillies auprès de ces 206 enfants.

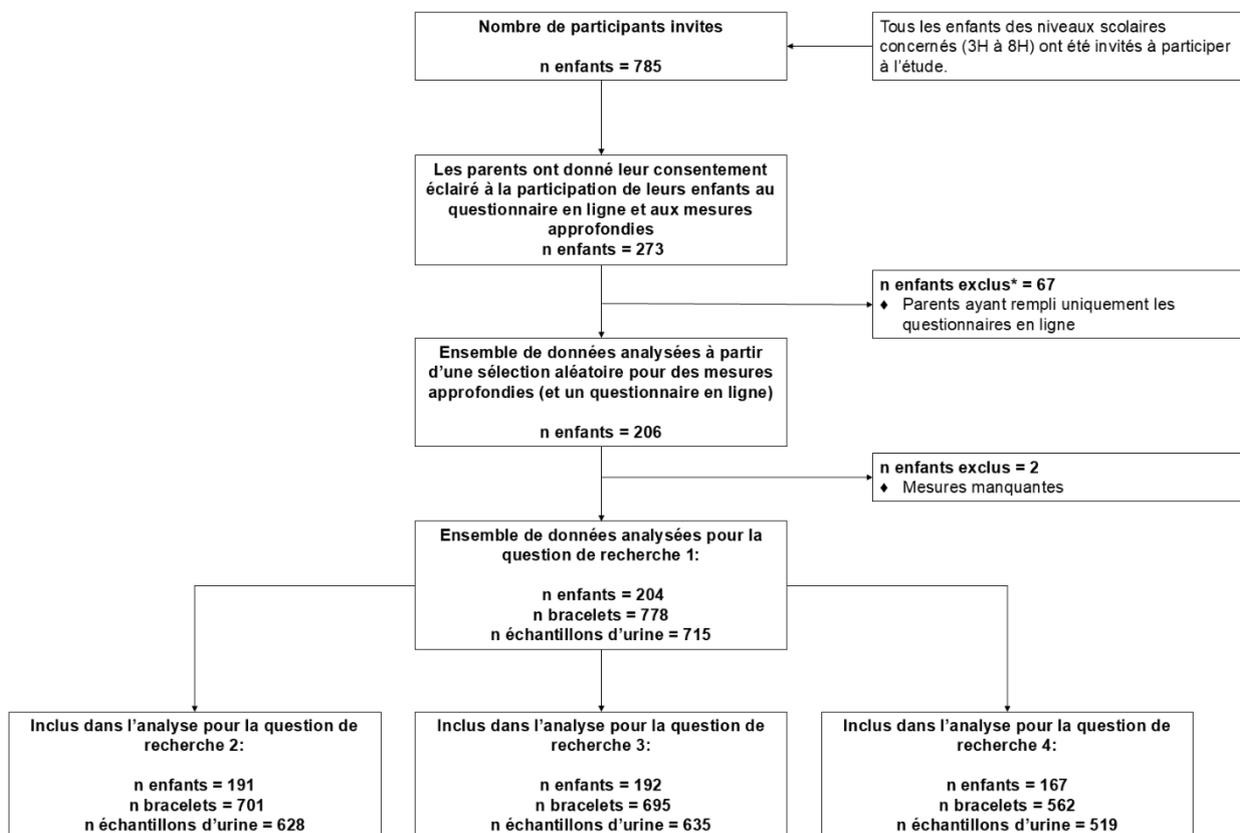


Illustration 4: Aperçu du processus d'intégration des enfants à l'étude, et critères d'inclusion et d'exclusion pour l'analyse des données en lien avec les quatre questions de recherche. **Question de recherche 1:** identification des pesticides auxquels les enfants sont exposés via l'air. **Question de recherche 2:** facteurs influençant l'exposition aux pesticides des enfants vivant à proximité de vignobles et de vergers. **Question de recherche 3:** corrélation entre l'exposition aux pesticides et les symptômes respiratoires aigus hebdomadaires. **Question de recherche 4:** corrélation entre l'exposition aux pesticides et les modifications de la fonction pulmonaire. * Données non utilisées pour étudier les quatre questions de recherche dans le présent rapport.

Les enfants sont âgés de 6 à 13 ans, avec une majorité de garçons (58%) par rapport aux filles (42%) (**Tableau 1**). La plupart des parents ont suivi des études secondaires (47%) ou supérieures (44%). Les familles couvrent des niveaux de revenus variés, près de la moitié d'entre elles (49%) gagnent entre CHF 4500.– et CHF 9000.– par mois. Dix-sept enfants (8%) ont déjà été diagnostiqués asthmatiques par un médecin, ce qui correspond à la moyenne nationale suisse de 10% ([Delgrande Jordan et al., 2022](#)). Au cours des quatre évaluations, 40,5% des parents ont signalé que leurs enfants présentaient des symptômes respiratoires aigus hebdomadaires, définis comme l'un des cinq problèmes respiratoires énumérés dans le **tableau 3**.

Tableau 1: Caractéristiques sociodémographiques des 206 enfants et de leurs parents.

	Total	Manquant (%)
N	206	
École (n (%))		0,0
Chamoson	77 (37,4)	
Saxon	99 (48,1)	
Salquenen	30 (14,6)	
Sexe de l'enfant = fille (n (%))	86 (41,7)	0,0
Âge de l'enfant [y] (moyenne (écart-type))	9,5 (1,7)	0,0
Niveau d'études de la/du responsable de l'enfant (n (%))		10,7
Enseignement primaire ou inférieur	17 (9,2)	
Enseignement secondaire	87 (47,3)	
Enseignement supérieur	80 (43,5)	
Revenu mensuel net du ménage (n (%))		11,2
< CHF 4500.–	7 (3,8)	
CHF 4500.– à 9000.–	89 (48,6)	
> CHF 9000.–	49 (26,8)	
Aucune réponse	38 (20,8)	
IMC standardisé pour l'âge et le sexe (moyenne (écart-type))	3,20 (0,53)	1,0
Asthme déjà diagnostiqué = oui (n (%))	17 (8,3)	1,0
Distance la plus courte entre le foyer [m]		0,5
et toute terre agricole (médiane (écart interquartile))	33,8 (43,4)	
et tout vignoble (médiane (écart interquartile))	64,2 (134,9)	
et tout verger (médiane (écart interquartile))	216,5 (421,5)	
Responsable de l'enfant répondant au questionnaire (n (%))		10,7
Mère	131 (71,2)	
Père	51 (27,7)	
Autre	2 (1,1)	
Membres du ménage travaillant dans l'agriculture (n (%))	22 (9,9)	

IMC = Indice de Masse Corporelle

RÉSULTATS

À quels pesticides les enfants participant à l'étude sont-ils exposés par le biais de l'air?

Les illustrations suivantes fournissent des informations sur la détection éventuelle de pesticides dans les bracelets et les échantillons d'urine des enfants.

Détection de pesticides dans les bracelets individuels:

- Des pesticides ont été détectés dans les bracelets de tous les enfants au cours d'au moins une évaluation (**Illustration 5**).
- Sur les 81 pesticides testés, 36 ont été trouvés dans les bracelets des enfants au cours d'au moins une période d'évaluation. En revanche, 45 pesticides n'ont pas été détectés (**Illustration 5**).
- Les fongicides représentent les pesticides les plus fréquemment détectés dans les bracelets individuels, avec 22 types différents identifiés au total, suivis par les herbicides (n = 10). Les insecticides sont les pesticides les moins fréquemment détectés, avec seulement quatre différents types observés (**Illustration 5**).
- En moyenne, 14 pesticides différents ont été détectés chez les enfants au cours des quatre évaluations (un au minimum et 32 au maximum) (**Illustration 5**).
- Sur les 36 pesticides détectés, 50% ont été décelés chez 5% ou moins des enfants (**Illustration 6**).
- Le nombre de pesticides détectés dans les bracelets des enfants est passé de 18 lors de l'évaluation de référence en janvier, à 29 au cours de la dernière période en juin (**Illustration 5**).
- Des pesticides ont été détectés dans les bracelets de 78,8% des enfants lors de l'évaluation B, de 94,4% d'entre eux lors de l'évaluation A1, de 95,9% lors de l'évaluation A2, et de 98,5% lors de l'évaluation A3 (**Illustration 6**).
- **Six fongicides** ont été détectés dans plus de 40% des bracelets des enfants au cours d'au moins une période d'évaluation: l'amétoctradine, le cyprodinil, le diméthomorphe, l'imazalil, le propiconazole et le métalaxyle (**Illustrations 6 et 7**).

Détection de pesticides dans les échantillons d'urine:

- Les biomarqueurs urinaires de pesticides pour l'hydroxy-boscalide et l'hydroxy-tébuconazole ont été détectés dans l'urine de tous les enfants au cours d'au moins une évaluation (**Illustration 6**).
- L'hydroxy-boscalide a été détecté dans 85,9% des échantillons d'urine au cours de l'évaluation B, dans 93% lors de l'évaluation A1, dans 95,2% au cours de l'évaluation A2, et dans 93,7% lors de l'évaluation A3 (**Illustration 6**).
- L'hydroxy-tébuconazole a été détecté dans 98,4% des échantillons d'urine au cours de l'évaluation B, dans 97,8% lors de l'évaluation A1, dans 99,5% au cours de l'évaluation A2, et dans 98,7% lors de l'évaluation A3 (**Illustration 6**).

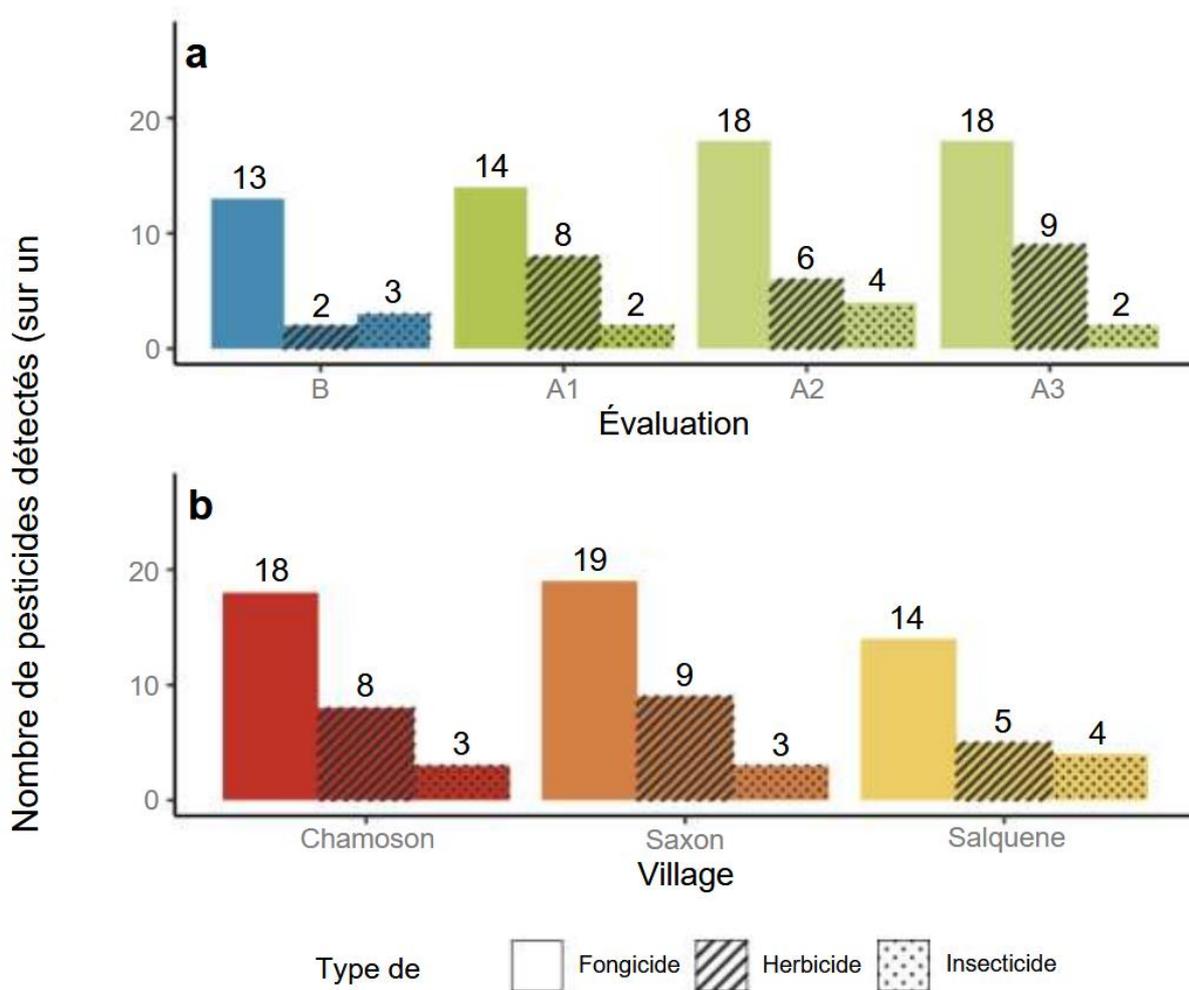


Illustration 5: Nombre de pesticides détectés dans les bracelets individuels des enfants (enfants: n = 204, bracelets: n = 778), répartition par type de pesticide (fongicide, herbicide, insecticide). **(a)** Les décomptes sont répartis par évaluation (B = évaluation de référence (bleu); A1–A3 (vert) = évaluations 1–3). **(b)** Les décomptes sont répartis par village.

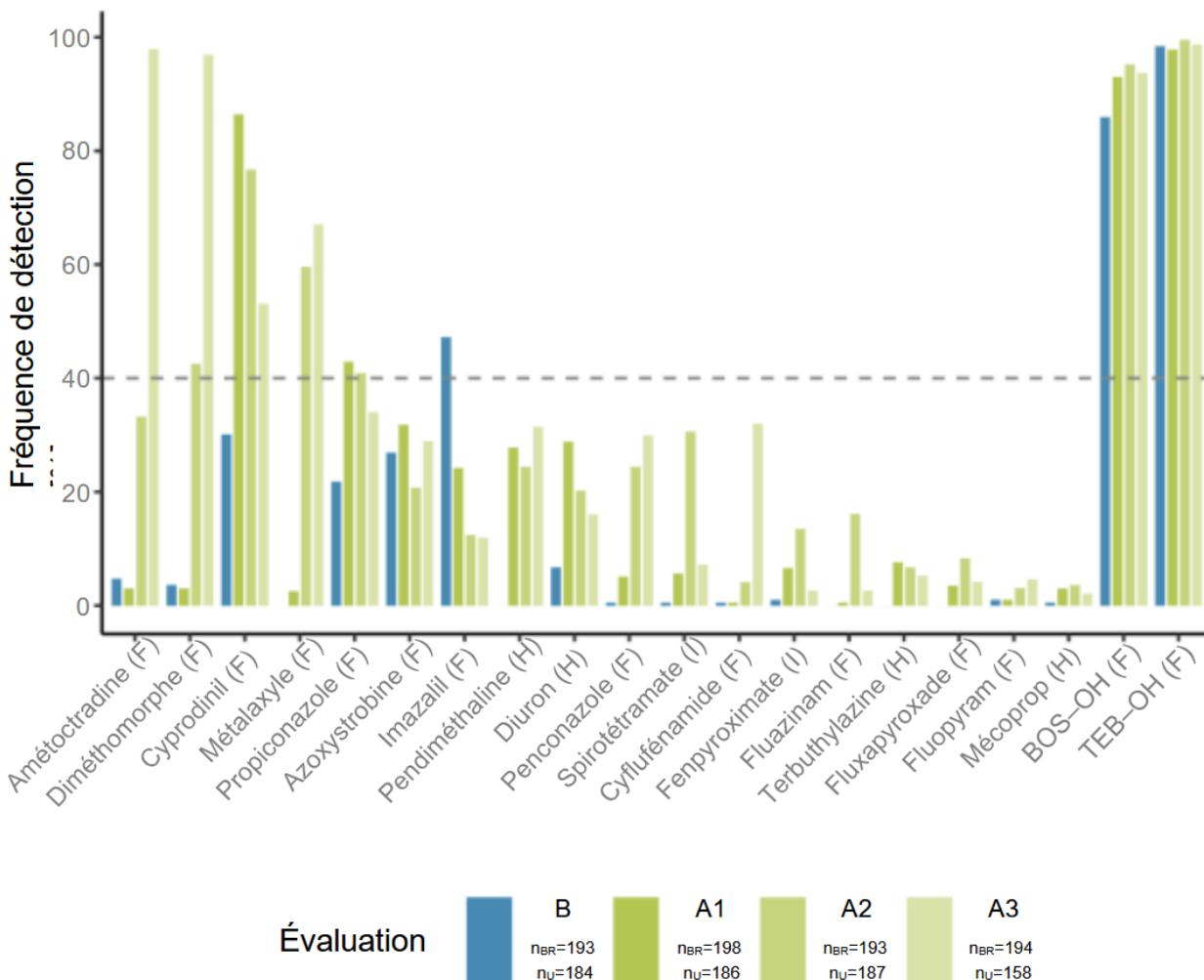


Illustration 6: Fréquence de détection [%] des pesticides mesurés sur les bracelets et sous forme de biomarqueurs urinaires (BOS-OH et TEB-OH) qui ont été détectés chez plus de 5% des enfants, répartis par évaluations. Les données comprennent 778 bracelets de 204 enfants ($n_B = 193$, $n_{A1} = 198$, $n_{A2} = 193$, $n_{A3} = 194$) et 715 échantillons d'urine de 202 enfants ($n_B = 184$, $n_{A1} = 186$, $n_{A2} = 187$, $n_{A3} = 158$). Les évaluations sont réparties comme suit: B = évaluation de référence (janvier), A1 = évaluation 1 (avril/mai), A2 = évaluation 2 (mai/juin) et A3 = évaluation 3 (juin) pendant l'année 2024. Les pesticides sont répartis comme suit: F (Fongicide), H (Herbicide) ou I (Insecticide). Les sources de mesures sont les suivantes: BR (bracelets) et U (urine).

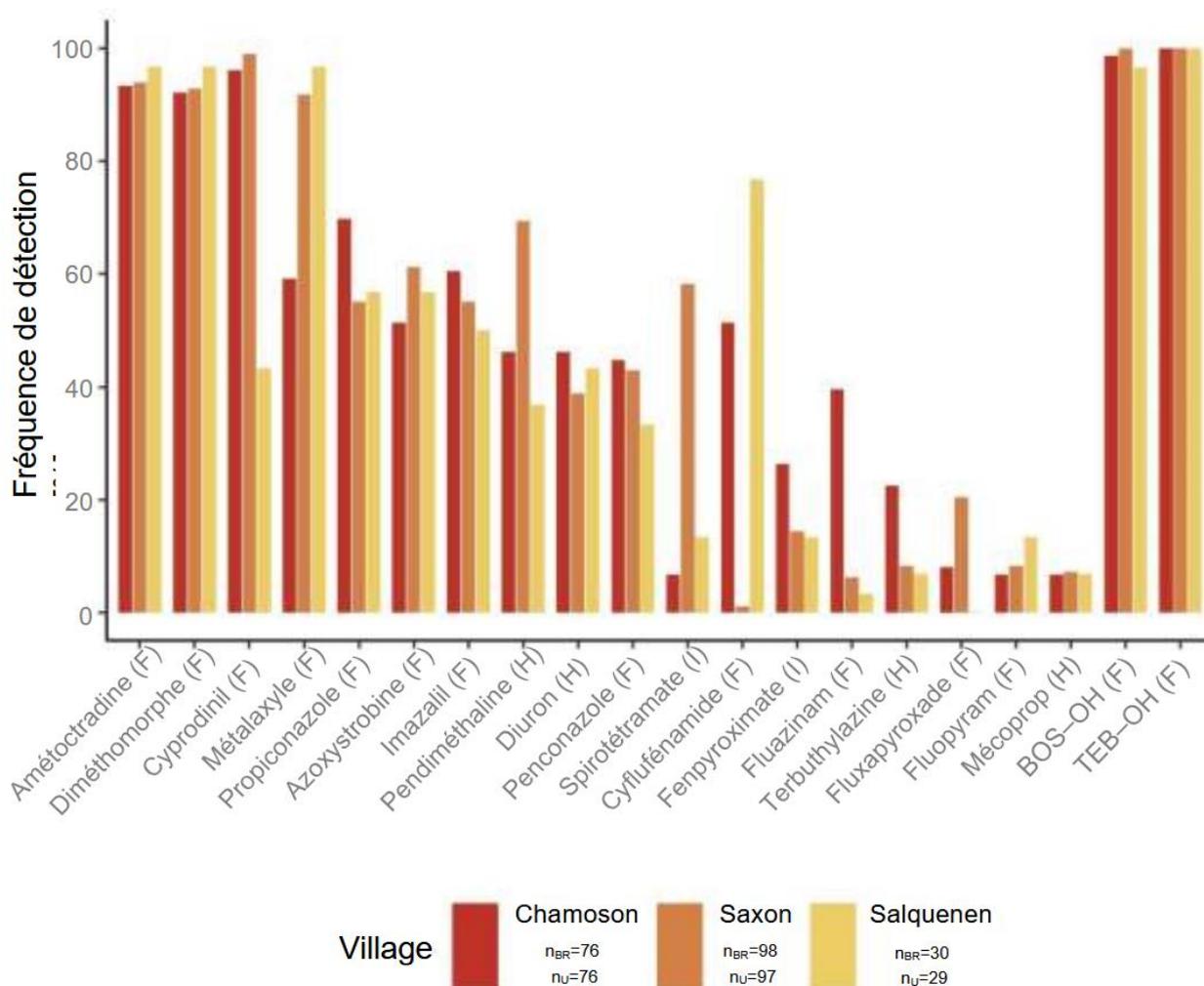


Illustration 7: Fréquence de détection [%] des pesticides mesurés sur les bracelets et sous forme de biomarqueurs urinaires (BOS-OH et TEB-OH) qui ont été détectés chez plus de 5% des enfants, répartis par village. Les données comprennent 778 bracelets ($n_{\text{Chamoson}} = 283$, $n_{\text{Saxon}} = 380$, $n_{\text{Salquenen}} = 115$) de 204 enfants ($n_{\text{Chamoson}} = 76$, $n_{\text{Saxon}} = 98$, $n_{\text{Salquenen}} = 30$), et 715 échantillons d'urine ($n_{\text{Chamoson}} = 271$, $n_{\text{Saxon}} = 362$, $n_{\text{Salquenen}} = 82$) de 202 enfants ($n_{\text{Chamoson}} = 76$, $n_{\text{Saxon}} = 97$, $n_{\text{Salquenen}} = 29$). Les pesticides sont répartis comme suit: F (Fongicide), H (Herbicide) ou I (Insecticide). Les sources de mesures sont les suivantes: BR (bracelets) et U (urine).

Quels sont les facteurs de risque d'une exposition à des pesticides spécifiques et à des intensités différentes?

Sélection de pesticides étudiés lors des questions de recherche 2 à 4:

Pour s'assurer de la fiabilité de l'analyse statistique et de la quantité suffisante de données, seuls les huit pesticides qui ont été détectés dans au moins 40% des échantillons au cours d'une des quatre évaluations ont été inclus dans les questions de recherche 2 à 4. Cette sélection comprend six fongicides détectés dans les bracelets (amétoctradine, cyprodinil, diméthomorphe, imazalil, propiconazole et métalaxyle) et deux biomarqueurs urinaires (hydroxy-boscalide et hydroxy-tébuconazole). Des modèles statistiques ont examiné la corrélation entre la concentration de pesticides mesurée et les facteurs de risque potentiels. Ils indiquent si un facteur de risque donné augmente ou diminue la concentration mesurée de pesticides.

- **Amétoctradine et diméthomorphe:** homologués pour les vignobles, ces fongicides ciblent l'oïdium et ont été fréquemment détectés au cours des deuxième et troisième évaluations (mai-juin 2024) (BLV, 2024a). Le diméthomorphe, dont l'homologation a été retirée en janvier 2025, a souvent été trouvé en combinaison avec l'amétoctradine.
- **Cyprodinil:** utilisé dans les vignobles et les vergers, ce fongicide lutte contre le botrytis et la tavelure des arbres fruitiers (BLV, 2024a). Il a été principalement détecté à Chamoson et Saxon lors de la première évaluation (avril 2024).
- **Métalaxyle:** homologué pour les vignobles et efficace contre l'oïdium et le botrytis (BLV, 2024a).
- **Propiconazole:** interdit pour l'usage agricole depuis 2022, après avoir été identifié en tant que perturbateur endocrinien potentiel (Arená et al., 2017). L'exposition détectée est probablement due à la persistance de ce pesticide dans le sol et à l'utilisation éventuelle d'anciens stocks (p. ex. dans l'agriculture, sur les terrains de sport ou comme biocide dans la sylviculture).
- **Imazalil:** interdit dans les vignobles et les vergers, sa détection peut s'expliquer par un contact avec des cultures alimentaires contaminées, p. ex. des agrumes pendant les mois d'hiver ou des pommes de terre (EFSA et al., 2018).
- **Hydroxy-boscalide et hydroxy-tébuconazole:** fongicide parent utilisé dans les vignobles et les vergers. L'exposition constante détectée dans l'urine des enfants au cours des évaluations, comparée à la variabilité des mesures observée avec les bracelets, peut être influencée par la contamination alimentaire.

Outre le net caractère saisonnier de la présence ou de l'absence de pesticides spécifiques dans les bracelets et l'urine (voir ci-dessus), l'étude a mis en évidence divers facteurs associés au niveau d'exposition aux pesticides en suspension dans l'air, à partir des six pesticides sélectionnés détectés dans les bracelets et des deux biomarqueurs urinaires:

Géographie: la concentration de l'exposition des enfants aux six pesticides examinés s'avère différente au sein des trois communes.

Proximité des terres agricoles: nous avons pu observer que la proximité avec différents types de terres agricoles augmente la concentration de cinq des huit pesticides examinés (boscalide, tébuconazole, métalaxyle, imazalil et propiconazole).

Superficie totale des vignobles et des vergers autour des domiciles: la concentration de six pesticides sur huit s'intensifie avec l'augmentation de la superficie totale des différents types de terres agricoles. Pour certains pesticides, les effets sont présents jusqu'à 1 km du domicile des participants.

Nous avons démontré que le type et la superficie des terres agricoles sont essentiels pour comprendre l'exposition aux pesticides en suspension dans l'air. Ces informations peuvent permettre de développer de meilleures stratégies de surveillance et de réduction de l'exposition aux pesticides en suspension dans l'air. Ceci étant, l'étude montre aussi qu'il ne suffit pas de connaître le lieu de vie des participants. La profession des parents, le comportement individuel, les habitudes de mobilité et les propriétés spécifiques de chaque pesticide jouent également un rôle important dans l'intensité de l'exposition.

Existe-t-il une corrélation entre la concentration de pesticides mesurée et les symptômes respiratoires aigus?

La prévalence des symptômes s'est avérée relativement faible lors de chaque évaluation: elle était de 9,2% lors de l'évaluation de référence, pour atteindre environ 20% lors des évaluations 1 à 3. Les symptômes les plus fréquemment signalés ont été la rhinite et la toux sèche sans rhume

ni bronchite, avec des taux allant de 2,2% à 16,2%. Parmi les 17 enfants diagnostiqués asthmatiques, 16 (94%) ont déclaré des symptômes respiratoires aigus hebdomadaires. Toutefois, la répartition inégale des symptômes au cours des diverses évaluations et les données relatives aux enfants non asthmatiques indiquent que ces problématiques ne sont pas exclusives à l'asthme.

Les modèles statistiques, ajustés pour le pollen et la pollution atmosphérique, n'ont révélé aucune association significative d'un point de vue statistique entre les symptômes respiratoires aigus hebdomadaires et la concentration des six pesticides ou des deux biomarqueurs de pesticides mesurés.

Tableau 3: Représentation binaire des symptômes respiratoires aigus hebdomadaires, notés n (%) et répartis par évaluation B = évaluation de référence; A1-3 = évaluations 1-3.

n oui (%)	Nbre total d'enfants	B	A1	A2	A3
n enfants/observations	205	184	192	175	185
Symptômes respiratoires aigus hebdomadaires	83 (40,5%)	17 (9,2%)	39 (20,3%)	39 (22,3%)	41 (22,2%)
Respiration sifflante**	7 (3,4%)	4 (2,2%)	3 (1,6%)	3 (1,7%)	3 (1,6%)
Respiration sifflante sévère	0	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Respiration sifflante après l'exercice physique	5 (2,4%)	2 (1,1%)	0 (0%)	2 (1,1%)	3 (1,6%)
Rhinite	51 (24,9%)	4 (2,2%)	20 (10,4%)	27 (15,4%)	30 (16,2%)
Toux sèche sans rhume/bronchite	49 (23,9%)	12 (6,5%)	23 (12%)	18 (10,3%)	16 (8,6%)
Enfants avec asthme diagnostiqué, nbre total et nbre présentant des symptômes respiratoires aigus hebdomadaires	16 (7,8%)	3 (1,6%)	6 (3,1%)	3 (1,7%)	4 (2,2%)

* Les points de données se réfèrent aux questionnaires des parents. ** Respiration sifflante: si votre enfant a présenté une respiration sifflante. Respiration sifflante sévère: la respiration sifflante a été sévère au point d'empêcher votre enfant de finir une phrase. Respiration sifflante après l'exercice physique: si votre enfant a présenté une respiration sifflante après l'exercice physique. Rhinite: si votre enfant a beaucoup éternué ou s'il a présenté des symptômes semblables à ceux d'un rhume sans avoir de rhume. Toux sèche sans rhume/bronchite: si votre enfant a eu une toux sèche sans avoir un rhume ou une bronchite.

Existe-t-il une corrélation entre la concentration de pesticides mesurée et des modifications de la fonction pulmonaire?

Pour la plupart des pesticides, nous n'avons pas pu identifier de lien entre la concentration de pesticides mesurée et une baisse des valeurs de la fonction pulmonaire. Une augmentation de la concentration de deux pesticides (**métalaxyle et propiconazole**) a été associée à un léger fléchissement de certains paramètres de la fonction pulmonaire chez les enfants.

DISCUSSION

L'étude PARVAL a examiné l'exposition aux pesticides en suspension dans l'air et ses impacts sur la santé respiratoire des écoliers vivant à proximité de vignobles et de vergers valaisans, en Suisse. Menée sur une durée de six mois en 2024, elle a examiné les cas de 206 enfants au cours de quatre évaluations. Avec un total de 778 échantillons par bracelets et de 627 tests de spirométrie, il s'agit de la plus grande étude de ce genre au niveau international. Il est important de noter qu'il s'agit de la première étude épidémiologique menée en Suisse pour examiner la corrélation entre l'exposition aux pesticides et les effets potentiels sur la santé.

Tous les enfants ont été exposés à au moins un pesticide, avec une moyenne de 14 pesticides détectés par enfant, et 36 pesticides distincts au total identifiés sur les 81 ciblés. La concentration de pesticides a mis en évidence de fortes variations saisonnières et à court terme, influencées par des facteurs tels que l'emplacement du village et l'utilisation des terres agricoles avoisinantes. La proximité des terres agricoles a été associée à une concentration plus élevée de certains pesticides. D'autres sources potentielles d'exposition aux pesticides telles que les terrains de sport, les produits ménagers ou les cultures alimentaires méritent une étude plus approfondie.

Nous n'avons trouvé aucun lien entre les symptômes respiratoires aigus et l'intensité de l'exposition aux pesticides. Toutefois, la concentration accrue de deux pesticides a été associée à une légère baisse à court terme de la fonction pulmonaire, mais qui n'était pas cohérente dans les différentes approches de modélisation. Ces résultats soulignent la nécessité de poursuivre les recherches dans le cadre d'études épidémiologiques de plus grande envergure, notamment en ce qui concerne l'exposition aux mélanges de pesticides et leurs effets potentiels sur la santé.

À quels pesticides les enfants sont-ils exposés par le biais de l'air?

Au cours de notre étude, la plupart des pesticides détectés (23 sur 36 = 64%) étaient des fongicides. C'est cohérent avec le contexte agricole des zones étudiées, les vignobles et les vergers étant très sensibles aux maladies fongiques et requérant une utilisation intensive de fongicides (BLW, 2024). Parmi les pesticides détectés, 30 étaient homologués pour une utilisation en Suisse en 2024. Plus précisément, 12 de ces pesticides étaient approuvés pour la pulvérisation par voie aérienne en hélicoptère (p. ex. le cyprodinil, le métalaxyle et le tébuconazole). Six des pesticides détectés (S-métolachlore, prochloraze, diuron, pencycuron, pymétozine et propiconazole) sont interdits d'utilisation dans l'agriculture suisse depuis 2020, chacun avec des périodes de retrait progressif différentes. Par exemple, l'utilisation des produits contenant du propiconazole n'est plus autorisée depuis le 1^{er} juillet 2022 (BLV, 2024b). Le matériel supplémentaire 3 (SI3) du rapport complet comprend un aperçu détaillé des propriétés chimiques et un comparatif avec la détection des pesticides ciblés réalisée par d'autres études en Suisse.

Cinq pesticides détectés au cours de notre étude (amétoctradine, imazalil, cyprodinil, tébuconazole et boscalide) ont déjà été identifiés lors d'études de biosurveillance humaine portant sur un échantillon aléatoire de 295 adultes à Bâle (EEA, 2023; Ottenbros et al., 2023). Comme dans cette étude, l'utilisation à court terme de pesticides et les situations d'exposition influencent les niveaux d'exposition, ce qui se traduit par des mélanges de pesticides différents par échantillon. Contrairement à l'étude urbaine menée à Bâle et consacrée à l'exposition par voie alimentaire, nous soulignons l'importance de l'exposition aux pesticides en suspension dans l'air dans les zones agricoles. Nous mettons ainsi en évidence la nécessité d'un suivi longitudinal approfondi, basé sur diverses méthodes, telles que les bracelets pour l'exposition par voie aérienne et les échantillons d'urine pour l'exposition par voie alimentaire.

Au-delà de la biosurveillance humaine, plusieurs de ces pesticides ont aussi été détectés précédemment dans le cadre d'études environnementales en Suisse, ce qui souligne leur présence généralisée dans l'environnement (17 pesticides détectés dans la pluie, neuf dans l'air (Carbotech, 2021) et huit dans l'eau (BAFU, 2022), au cours de programmes d'observation). Six des pesticides sont également abordés dans le Plan d'action national Produits phytosanitaires afin d'en limiter l'utilisation (BLW, 2017).

Nous n'avons pas comparé les concentrations de pesticides dans les bracelets et les échantillons d'urine avec les seuils toxicologiques. Il est également important de noter que notre évaluation des pesticides détectés s'est limitée à leur potentiel irritant pour les voies respiratoires.

Quels sont les facteurs de risque potentiels d'une exposition à des pesticides spécifiques et à des intensités différentes ?

Outre la nette corrélation entre les saisons et l'exposition, nous avons également établi un lien entre la proximité avec des terres agricoles et l'étendue des terres agricoles environnantes, et l'exposition aux huit pesticides les plus fréquemment détectés dans les bracelets et les échantillons d'urine, ce qui souligne l'impact de la dérive de pulvérisation depuis les champs voisins. Les associations entre l'exposition aux pesticides et l'utilisation des terres agricoles étendues aux zones tampons de 1 km autour des domiciles des enfants suggèrent que les pesticides peuvent dériver sur des distances considérables. Les différences de présence et de niveaux de pesticides entre les communes de Chamoson, Saxon et Salquenen mettent également en évidence le rôle de l'utilisation locale des terres (à savoir les différences entre les vignobles et les vergers). Ces résultats, cohérents avec ceux d'autres études, soulignent l'importance de prendre en compte des facteurs spécifiques aux cultures, aux distances et aux zones pour évaluer les risques d'exposition aux pesticides dans différentes parties du monde (Figueiredo et al., 2021; Fuhrmann et al., 2021; Teysseire et al., 2020). Par exemple, les concentrations élevées de cyprodinil, de diméthomorphe, d'amétoctradine, de métalaxyle-M, de boscalide et de tébuconazole reflètent probablement leur utilisation actuelle dans les vignobles et les vergers. Une étude menée aux États-Unis (Yang et al., 2023), qui a montré que 23% des adultes vivant dans un rayon de 2 km autour de sites d'application de pesticides commerciaux ont été exposés à l'hydroxy-boscalide et 21% au cyprodinil, corrobore ce lien. Cela augmente les risques d'exposition, en particulier pour les enfants qui passent du temps à l'extérieur. Ces résultats plaident en faveur de la mise en œuvre de zones tampons sur mesure afin d'atténuer l'exposition, adaptées en fonction des pesticides spécifiques et des scénarios locaux d'utilisation des terres. En revanche, l'association entre le propiconazole et les zones viticoles peut relever d'applications passées ou de l'utilisation d'anciens stocks, malgré son interdiction.

Pour la plupart des pesticides, nous avons pu observer une augmentation de nombre de pesticides détectés et de leur concentration entre janvier et juin 2024, ce qui correspond à la saison de pulvérisation. Cette tendance saisonnière est cohérente avec une étude française (Raheison et al., 2019) qui a détecté des concentrations de pesticides en suspension dans l'air plus élevées pendant les saisons de viticulture que pendant les mois d'hiver. Les valeurs mesurées reposaient à la fois sur la surveillance de l'air et sur des échantillons d'urine. Les pesticides décelés lors de cette étude française sont notamment similaires à ceux de l'étude PARVAL, avec une forte prévalence des fongicides (le diméthomorphe, le tébuconazole et le cyprodinil ont p. ex. été détectés par les deux études).

Il est intéressant de noter que les biomarqueurs urinaires de notre étude n'ont mis en évidence aucune tendance saisonnière, ce qui indique que l'apport alimentaire est une source d'exposition constante. Cette constatation est étayée par une étude décrivant la probabilité d'exposition à un ensemble de pesticides dans des échantillons d'urine prélevés dans cinq pays européens (Ottenbros et al., 2023). Tout d'abord, de fortes concentrations d'hydroxy-boscalide ont également été trouvées dans au moins quatre des cinq pays évalués. Ensuite, les résultats n'ont pas montré de tendances cohérentes lors de l'évaluation de facteurs prédictifs tels que la zone agricole ou la saison de collecte des échantillons d'urine.

L'exposition aux pesticides des enfants en Valais est conditionnée par l'utilisation des terres agricoles, mais aussi par des facteurs spatiaux, saisonniers, démographiques et communautaires. L'exposition est influencée par les propriétés des pesticides, l'utilisation locale des terres et des pesticides, mais aussi par les déplacements des enfants, très probablement au-delà d'un rayon de 1 km autour de leur domicile. La forte variabilité temporelle observée souligne la nécessité de mener des évaluations de l'exposition cumulée à long terme, et cette approche a été rarement employée lors des recherches antérieures. Ces résultats justifient des stratégies

complètes de surveillance et de réduction de l'exposition aux pesticides, notamment pour les populations vulnérables vivant à proximité des zones agricoles.

Existe-t-il une corrélation entre les pesticides mesurés et les symptômes respiratoires aigus signalés?

La prévalence de l'asthme diagnostiqué par un médecin au sein de la population étudiée est conforme à la moyenne nationale suisse pour les enfants, soit environ 10% (Delgrande Jordan et al., 2022). L'incidence hebdomadaire des symptômes respiratoires aigus signalés par les parents a augmenté de manière significative pour passer de 10% pendant la saison sans pulvérisation à 20% pendant la saison de pulvérisation. Toutefois, aucune association à court terme n'a été identifiée avec les concentrations des huit pesticides mesurés, un résultat cohérent avec les conclusions de précédentes études, comme celles menées aux Pays-Bas (Wijga et al., 2014). Il est important de noter que plusieurs pesticides, tels que les sulfures (Raanan et al., 2017) et les pyréthriinoïdes (Islam et al., 2023), qui sont utilisés en quantités considérables et dont l'association avec des symptômes respiratoires a été démontrée dans d'autres études, n'ont pas été inclus dans notre analyse en raison de ressources limitées. D'autres pesticides, comme le mancozèbe et le chlorpyrifos, qui ont déjà montré des effets, ne sont plus utilisés en Suisse et n'ont donc pas été inclus dans cette étude.

L'absence d'association entre la santé respiratoire (infections respiratoires aiguës) et l'exposition aux pesticides doit être interprétée avec prudence, car le faible nombre de symptômes respiratoires signalés a limité la puissance statistique nécessaire pour détecter des effets potentiels. En outre, des études ont établi des associations entre l'exposition aux pesticides et des effets potentiels sur la santé respiratoire à long terme (Keleb et al., 2024; Yang et al., 2023). Les résultats basés sur les symptômes respiratoires directement signalés par les parents peuvent être influencés par un biais de déclaration de ces parents, ce qui peut entraîner une sous-estimation ou une surestimation de la prévalence réelle des symptômes.

Existe-t-il une corrélation entre les pesticides mesurés et les modifications de la fonction pulmonaire?

De manière générale, nos résultats ne révèlent aucune association, ou peu d'associations, entre la concentration de pesticides et la baisse des niveaux de fonction pulmonaire pour les huit pesticides et les cinq paramètres de fonction pulmonaire examinés. Des associations négatives, certes peu nombreuses, mais statistiquement significatives, ont été observées pour le propiconazole et le métalaxyle. Même si les réductions de la fonction pulmonaire observées sont modestes, elles peuvent indiquer des modifications subtiles des voies respiratoires ou des signes précoces de stress respiratoire. Cela souligne la nécessité de poursuivre les recherches sur les effets à long terme de l'exposition aux pesticides sur la santé, de manière similaire aux préoccupations soulevées par les études sur la pollution atmosphérique (Obaseki et al. 2014, Kwon et al. 2020).

D'autres études rapportent généralement des effets minimes, voire l'absence d'effets de l'exposition aux pesticides en suspension dans l'air sur la fonction pulmonaire (Mamane et al., 2015). Par rapport à d'autres études, nous avons évalué un panel plus vaste de pesticides, soit 81 au total. Nous nous sommes concentrés sur ceux potentiellement irritants pour les voies respiratoires et actuellement utilisés en Suisse. Des recherches épidémiologiques antérieures ont notamment mis en évidence les effets de certains pesticides, tels que les organophosphates (Hansen et al., 2021) et le mancozèbe (Islam et al., 2023), qui sont tous deux déjà interdits et ne sont plus utilisés dans la région étudiée. D'autres pesticides potentiellement pertinents, tels que le soufre et les pyréthriinoïdes, dont les effets ont été démontrés lors de précédentes études, n'ont pas été examinés lors de celle-ci et devraient faire l'objet de recherches ultérieures.

Notre étude fait progresser les connaissances en utilisant des mesures directes de l'exposition aux pesticides et des méthodes de biosurveillance humaine (BSH), plutôt que de s'appuyer sur des indicateurs indirects tels que la proximité résidentielle. Grâce aux bracelets et aux échantillons d'urine, nous avons proposé une évaluation plus précise de l'exposition aux pesticides en suspension dans l'air, en comparaison par exemple avec la cohorte de naissance néerlandaise PIAMA (Bukalasa et al., 2017). En mesurant l'exposition dans les bracelets et les échantillons d'urine, cette étude révèle la complexité des voies d'exposition grâce à une approche à plusieurs matrices. Elle souligne l'importance d'intégrer des techniques d'échantillonnage multiples pour une évaluation complète de l'exposition des enfants aux produits chimiques présents dans l'environnement (Mora et al., 2020; Probst-Hensch et al., 2022).

Nos résultats offrent de précieuses indications pour le pilotage des plans de recherche dans le monde, et plus particulièrement en Suisse. Si l'étude n'a pas démontré d'effet mesurable pour la plupart des pesticides, les légères diminutions de la fonction pulmonaire associées à quelques-uns d'entre eux pourraient avoir des conséquences à long terme, notamment sur les populations exposées de manière prolongée (Iyanna et al., 2023; Mehta et al., 2012). Les groupes vulnérables, tels que les enfants asthmatiques, les personnes âgées et celles présentant une affection préexistante, pourraient être exposés à un risque accru. Les futures études plus vastes consacrées aux mécanismes sous-jacents de ces effets devraient également tenir compte des effets cumulés et synergiques, sachant que nous avons détecté en moyenne 14 pesticides par enfant au cours des quatre évaluations. Cela met en évidence la nécessité d'examiner les effets potentiels du mélange de pesticides dans les futures recherches.

RECOMMANDATIONS

Pour réduire l'exposition aux pesticides identifiés, nous proposons des recommandations ciblées:

Autorités:

- Soutenir la mise en place de systèmes de surveillance de la pulvérisation de pesticides (à savoir la surveillance planifiée via digiFLUX) qui permettent d'accéder aux données sur l'heure, le lieu et le volume des activités spécifiques de pulvérisation de pesticides en Suisse. Ce système répond aux exigences légales (art. 165^{bis} LAgr) entrée en vigueur en 2024 et il est soutenu par le Service Cantonal de l'Agriculture (SCA). L'Office fédéral de l'agriculture (OFAG) est responsable de sa mise en œuvre.
- Étudier les réglementations relatives aux zones tampons autour des terrains de jeu, des terrains de sport et des écoles afin de limiter les risques d'exposition. Le SCA recommande une zone tampon de 6 mètres de large entre les zones agricoles et les zones à bâtir (réparties de manière égale). Mise en place à long terme dans le cadre de projets tels que le «Vignoble du 21^{ème} siècle» (voir Guide technique, point 3.2) Les municipalités devraient introduire ces zones tampons lors de la révision de leurs plans de zones.
- Inspecter les exploitations agricoles et les autres utilisateurs de pesticides, comme les clubs sportifs, afin de régler le problème des stocks de pesticides obsolètes et de promouvoir l'utilisation d'alternatives homologuées et plus sûres. Le Service de l'agriculture n'étant pas responsable des zones non agricoles, telles que les terrains de sport et les parcs publics, il faut veiller à ce que les autorités compétentes y supervisent l'utilisation des pesticides.
- Surveiller les niveaux d'exposition aux pesticides des enfants vivant dans des zones agricoles en Suisse, en se concentrant sur des expositions à de multiples pesticides provenant de différentes sources (OSAV et OFSP).
- Accorder la priorité aux recherches concernant les effets sur la santé des groupes sensibles, tels que les enfants asthmatiques, afin de mieux comprendre leurs vulnérabilités. Les études devraient inclure les propriétaires d'exploitations agricoles, leur personnel, les riverains, mais aussi les animaux, afin d'offrir une perspective interdisciplinaire One Health.
- Soutenir la poursuite des recherches sur les risques potentiels pour la santé associés à l'exposition aux pesticides, y compris les effets à long terme sur la santé respiratoire, mais

également neurologiques et liés à la reproduction. Ces études devraient être conçues de manière large et inclusive, en intégrant non seulement les personnes vivant à proximité des zones agricoles, mais aussi les propriétaires d'exploitations agricoles, leur personnel, ainsi que les animaux, afin de permettre une évaluation globale selon l'approche One Health.

- Promouvoir le dialogue public sur les raisons qui justifient l'utilisation de pesticides et les mesures prises pour réduire les risques. En créant par exemple des plateformes de décision participative (réseaux locaux) pour une meilleure gestion des pesticides. Celles-ci permettraient aux propriétaires d'exploitations agricoles, à leur personnel et aux riverains de travailler ensemble à l'élaboration de politiques locales de gestion des pesticides, la réduction des risques et la résolution des conflits sur la base des besoins locaux ([Netting, 1981](#)), conformément à la fructueuse tradition de gestion communautaire de l'agriculture dans le canton du Valais.
- Élaborer des conseils pratiques sur les mesures de réduction de l'exposition aux pesticides à l'attention des riverains, telles que:
 - réduire la contamination due à la poussière domestique;
 - éviter que les enfants jouent dans les vignobles ou les vergers pendant la saison de pulvérisation;
 - réduire l'exposition due à l'utilisation de pesticides domestiques (production artisanale, jardin privé).

Communauté agricole

- Mettre en place des techniques de pulvérisation de pointe afin de réduire la dérive de pulvérisation (p. ex. méthodes de précision telles que la pulvérisation par drone et les buses anti-dérive).
- Éliminer les stocks de pesticides obsolètes et vérifier la conformité avec les réglementations en vigueur afin de s'assurer que seuls les produits approuvés sont utilisés.
- Les parents exposés aux pesticides dans le cadre de leur activité professionnelle doivent éviter de ramener à leur domicile des vêtements susceptibles de contenir des poussières de pesticides.

FINANCEMENT

L'étude PARVAL est financée par le Département de la Santé du canton du Valais. Une partie de la collecte et de l'analyse des données a été soutenue par un SNSF Starting Grant du Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS) (référence subvention TMSG13_211325) et une subvention dans le cadre de l'Appel à projets collaboratifs entre le FNS, le NRF et le FORMAS pour accélérer la réalisation des Objectifs de développement durable (ODD) (référence subvention 40CF40_221709). Le groupe d'accompagnement désigné par le gouvernement du canton du Valais (représentants de l'Observatoire valaisan de la santé et de l'Office du médecin cantonal) a contribué à l'organisation de l'étude et à la coordination avec les partenaires locaux. Il a également révisé le rapport.

DÉCLARATION D'INTÉRÊT

Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

RÉFÉRENCES

Applied Mass Spectrometry in Environmental Medicine | Lund University. (2024). <https://www.lunduniversity.lu.se/lucat/group/v1001233>

Arcury, T. A., Chen, H., Arnold, T. J., Quandt, S. A., Anderson, K. A., Scott, R. P., Talton, J. W., & Daniel, S. S. (2021). Pesticide Exposure Among Latinx Child Farmworkers in North Carolina. *American Journal of Industrial Medicine*, 64(7), 602–619. <https://doi.org/10.1002/ajim.23258>

Arena, M., Auteri, D., Barmaz, S., Bellisai, G., Brancato, A., Brocca, D., Bura, L., Byers, H., Chiusolo, A., Court Marques, D., Crivellente, F., De Lentdecker, C., De Maglie, M., Egsmose, M., Erdos, Z., Fait, G., Ferreira, L., Goumenou, M., Greco, L., ... Villamar-Bouza, L. (2017). Peer review of the pesticide risk assessment of the active substance propiconazole. *EFSA Journal*, 15(7), e04887. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2017.4887>

Asher, M. I., Keil, U., Anderson, H. R., Beasley, R., Crane, J., Martinez, F., Mitchell, E. A., Pearce, N., Sibbald, B., & Stewart, A. W. (1995). International Study of Asthma and Allergies in Childhood (ISAAC): Rationale and methods. *The European Respiratory Journal*, 8(3), 483–491. <https://doi.org/10.1183/09031936.95.08030483>

BAFU. (2022). *Erste nationale Analyse zum Zustand der Gewässer zeigt Fortschritte und Defizite auf*. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/mitteilungen.msg-id-90006.html>

BLV. (2024a). *Zugelassene Pflanzenschutzmittel*. <https://www.blv.admin.ch/blv/de/home/zulassung-pflanzenschutzmittel/zulassung-und-gezielte-ueberpruefung/zugelassene-pflanzenschutzmittel.html>

BLV. (2024b). *Zurückgezogene Pflanzenschutzmittel*. <https://www.blv.admin.ch/blv/de/home/zulassung-pflanzenschutzmittel/anwendung-und-vollzug/zurueckgezogene-pflanzenschutzmittel.html>

BLW. (2017). *Aktionsplan Pflanzenschutzmittel*. <https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/nachhaltige-produktion/pflanzenschutz/aktionsplan.html>

BLW. (2023). *Verkaufsmengen der Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffe*. <https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/nachhaltige-produktion/pflanzenschutz/verkaufsmengen-der-pflanzenschutzmittel-wirkstoffe.html>

BLW. (2024). *Pflanzenschutzmitteleinsatz in der Schweiz. Agrarbericht*. <https://www.agrarbericht.ch/de/umwelt/wasser/psm-einsatz>

- Braun-Fahrländer, C., Vuille, J. C., Sennhauser, F. H., Neu, U., Künzle, T., Grize, L., Gassner, M., Minder, C., Schindler, C., Varonier, H. S., & Wüthrich, B. (1997). Respiratory health and long-term exposure to air pollutants in Swiss schoolchildren. SCARPOL Team. Swiss Study on Childhood Allergy and Respiratory Symptoms with Respect to Air Pollution, Climate and Pollen. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 155(3), 1042–1049. <https://doi.org/10.1164/ajrccm.155.3.9116984>
- Bukalasa, J. S., Brunekreef, B., Brouwer, M., Vermeulen, R., De Jongste, J. C., Van Rossem, L., Vonk, J. M., Wijga, A., Huss, A., & Gehring, U. (2017). Proximity to agricultural fields as proxy for environmental exposure to pesticides among children: The PIAMA birth cohort. *Science of The Total Environment*, 595, 515–520. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.269>
- Buralli, R. J., Dultra, A. F., & Ribeiro, H. (2020). Respiratory and Allergic Effects in Children Exposed to Pesticides—A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8), 2740. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082740>
- Carbotech, B. (2021). *Pilotmessungen von Pflanzenschutzmitteln in Luft und Regen*. Carbotech, 2021. <https://carbotech.ch/projekte/pflanzenschutzmitteln-in-luft-und-regen/>
- Delgrande Jordan, M., Schmidhauser, V., & Balsiger, N. (2022). Santé et bien-être des 11 à 15 ans en Suisse – Situation en 2022, évolution dans le temps et corrélats. *Addiction Suisse*. <https://doi.org/10.58758/rech159>
- EEA. (2023). *How pesticides impact human health and ecosystems in Europe* [Briefing]. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/how-pesticides-impact-human-health/how-pesticides-impact-human-health>
- EFSA, E. F. S., Brancato, A., Brocca, D., Carrasco Cabrera, L., De Lentdecker, C., Erdos, Z., Ferreira, L., Greco, L., Jarrar, S., Kardassi, D., Leuschner, R., Lostia, A., Lythgo, C., Medina, P., Miron, I., Molnar, T., Pedersen, R., Reich, H., Sacchi, A., ... Villamar-Bouza, L. (2018). Updated review of the existing maximum residue levels for imazalil according to Article 12 of Regulation (EC) No 396/2005 following new toxicological information. *EFSA Journal*, 16(10), e05453. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5453>
- Figueiredo, D. M., Krop, E. J. M., Duyzer, J., Gerritsen-Ebben, R. M., Gooijer, Y. M., Holterman, H. J., Huss, A., Jacobs, C. M. J., Kivits, C. M., Kruijne, R., Mol, H. J. G. J., Oerlemans, A., Sauer, P. J. J., Scheepers, P. T. J., van de Zande, J. C., van den Berg, E., Wenneker, M., & Vermeulen, R. C. H. (2021). Pesticide Exposure of Residents Living Close to Agricultural Fields in the Netherlands: Protocol for an Observational Study. *JMIR Research Protocols*, 10(4), e27883. <https://doi.org/10.2196/27883>
- Fuhrimann, S., Mol, H. G. J., Dias, J., Dalvie, M. A., Rösli, M., Degrendele, C., Figueiredo, D. M., Huss, A., Portengen, L., & Vermeulen, R. (2021). Quantitative assessment of multiple pesticides in silicone wristbands of children/guardian pairs living in agricultural areas in South Africa. *The Science of the Total Environment*, 812, 152330. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152330>
- Galea, K. S., MacCalman, L., Jones, K., Cocker, J., Teedon, P., Cherrie, J. W., & van Tongeren, M. (2015). Urinary biomarker concentrations of captan, chlormequat, chlorpyrifos and cypermethrin in UK adults and children living near agricultural land. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 25(6), 623–631. <https://doi.org/10.1038/jes.2015.54>
- Gilden, R. C., Harris, R. L., Friedmann, E. J., Han, M., Hackney, A. J., Olorunyemi, E., & Spanier, A. J. (2023). Systematic Review: Association of Pesticide Exposure and Child Wheeze and Asthma. *Current Pediatric Reviews*, 19(2), 169–178. <https://doi.org/10.2174/1573396318666220510124457>

- Hansen, M. R. H., Jørs, E., Sandbæk, A., Sekabojja, D., Ssempebwa, J. C., Mubeezi, R., Staudacher, P., Fuhrmann, S., Sigsgaard, T., Burdorf, A., Bibby, B. M., & Schlünssen, V. (2021). Organophosphate and carbamate insecticide exposure is related to lung function change among smallholder farmers: A prospective study. *Thorax*, 76(8), 780–789. <https://doi.org/10.1136/thoraxjnl-2020-214609>
- Hyland, C., & Laribi, O. (2017). Review of take-home pesticide exposure pathway in children living in agricultural areas. *Environ Res*, 156, 559–570. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.04.017>
- Islam, J. Y., Hoppin, J., Mora, A. M., Soto-Martinez, M. E., Gamboa, L. C., Castañeda, J. E. P., Reich, B., Lindh, C., & van Wendel de Joode, B. (2023). Respiratory and allergic outcomes among 5-year-old children exposed to pesticides. *Thorax*, 78(1), 41–49. <https://doi.org/10.1136/thoraxjnl-2021-218068>
- Iyanna, N., Yolton, K., LeMasters, G., Lanphear, B. P., Cecil, K. M., Schwartz, J., Brokamp, C., Rasnick, E., Xu, Y., MacDougall, M. C., & Ryan, P. H. (2023). Air Pollution Exposure and Social Responsiveness in Childhood: The Cincinnati Combined Childhood Cohorts. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 251, 114172. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2023.114172>
- Keleb, A., Daba, C., Asmare, L., Bayou, F. D., Arefaynie, M., Mohammed, A., Tareke, A. A., Kebede, N., Tsega, Y., Endawkie, A., Kebede, S. D., Abera, K. M., Abeje, E. T., & Enyew, E. B. (2024). The association between children's exposure to pesticides and asthma, wheezing, and lower respiratory tract infections. A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Public Health*, 12, 1402908. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1402908>
- Kwon, D. S., Choi, Y. J., Kim, T. H., Byun, M. K., Cho, J. H., Kim, H. J., & Park, H. J. (2020). FEF25-75% Values in Patients with Normal Lung Function Can Predict the Development of Chronic Obstructive Pulmonary Disease. *International Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease*, 15, 2913–2921. <https://doi.org/10.2147/COPD.S261732>
- Lee, K.-S., Lim, Y.-H., Lee, Y. A., Shin, C. H., Kim, B.-N., Hong, Y.-C., & Kim, J. I. (2022). The association of prenatal and childhood pyrethroid pesticide exposure with school-age ADHD traits. *Environment International*, 161, 107124. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107124>
- Lewis, K. A., Tzilivakis, J., Warner, D., & Green, A. (2016). *An international database for pesticide risk assessments and management*. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/Reports/1358.htm>
- Mamane, A., Raheison, C., Tessier, J.-F., Baldi, I., & Bouvier, G. (2015). Environmental exposure to pesticides and respiratory health. *European Respiratory Review*, 24(137), 462–473. <https://doi.org/10.1183/16000617.00006114>
- Mehta, A. J., Miedinger, D., Keidel, D., Bettschart, R., Bircher, A., Bridevaux, P.-O., Curjuric, I., Kromhout, H., Rochat, T., Rothe, T., Russi, E. W., Schikowski, T., Schindler, C., Schwartz, J., Turk, A., Vermeulen, R., Probst-Hensch, N., & Künzli, N. (2012). Occupational Exposure to Dusts, Gases, and Fumes and Incidence of Chronic Obstructive Pulmonary Disease in the Swiss Cohort Study on Air Pollution and Lung and Heart Diseases in Adults. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 185(12), 1292–1300. <https://doi.org/10.1164/rccm.201110-1917OC>
- MIR. (2019). *Spirobank Smart Spirometer with Mobile App*. MIR. <http://spirometry.com>
- Mora, A. M., Hoppin, J. A., Córdoba, L., Cano, J. C., Soto-Martínez, M., Eskenazi, B., Lindh, C. H., & van Wendel de Joode, B. (2020). Prenatal pesticide exposure and respiratory health outcomes in the first year of life: Results from the infants' Environmental Health (ISA) study. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 225(January), 113474. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2020.113474>

- Netting, R. M. (with Internet Archive). (1981). *Balancing on an Alp: Ecological change and continuity in a Swiss mountain community*. Cambridge [Eng.]; New York : Cambridge University Press. <http://archive.org/details/balancingonalpec00nett>
- Norén, E., Lindh, C., Rylander, L., Glynn, A., Axelsson, J., Littorin, M., Faniband, M., Larsson, E., & Nielsen, C. (2020). Concentrations and temporal trends in pesticide biomarkers in urine of Swedish adolescents, 2000-2017. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 30(4), 756–767. <https://doi.org/10.1038/s41370-020-0212-8>
- Obaseki, D., Akanbi, M., Onyedum, C., Ozoh, O., Jumbo, J., Akor, A., & Erhabor, G. (2014). Peak Expiratory Flow as a Surrogate for Health Related Quality of Life in Chronic Obstructive Pulmonary Disease: A Preliminary Cross Sectional Study. *Ghana Medical Journal*, 48(2), 85–90.
- Ohlander, J., Fuhrmann, S., Basinas, I., Cherrie, J. W., Galea, K. S., Povey, A. C., van Tongeren, M., Harding, A. H., Jones, K., Vermeulen, R., & Kromhout, H. (2020). Systematic review of methods used to assess exposure to pesticides in occupational epidemiology studies, 1993-2017. *Occup Environ Med*, 77(6), 357–367. <https://doi.org/10.1136/oemed-2019-105880>
- Ottenbros, I. B., Ammann, P., Imboden, M., Fuhrmann, S., Zock, J.-P., Lebet, E., Vermeulen, R. C. H., Nijssen, R., Lommen, A., Mol, H., Vlaanderen, J. J., & Probst-Hensch, N. (2023). Urinary pesticide mixture patterns and exposure determinants in the adult population from the Netherlands and Switzerland: Application of a suspect screening approach. *Environmental Research*, 239(Pt 1), 117216. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117216>
- Probst-Hensch, N., Bochud, M., Chiolero, A., Crivelli, L., Dratva, J., Flahault, A., Frey, D., Kuenzli, N., Puhon, M., Suggs, L. S., & Wirth, C. (2022). Swiss Cohort & Biobank—The White Paper. *Public Health Rev*, 43, 1605660. <https://doi.org/10.3389/phrs.2022.1605660>
- Raanan, R., Gunier, R. B., Balmes, J. R., Beltran, A. J., Harley, K. G., Bradman, A., & Eskenazi, B. (2017). Elemental sulfur use and associations with pediatric lung function and respiratory symptoms in an agricultural community (California, USA). *Environmental Health Perspectives*, 125(8), 087007.
- Raherison, C., Baldi, I., Pouquet, M., Berteaud, E., Moesch, C., Bouvier, G., & Canal-Raffin, M. (2019). Pesticides Exposure by Air in Vineyard Rural Area and Respiratory Health in Children: A pilot study. *Environmental Research*, 169, 189–195. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.11.002>
- Teyssie, R., Manangama, G., Baldi, I., Carles, C., Brochard, P., Bedos, C., & Delva, F. (2020). Assessment of residential exposures to agricultural pesticides: A scoping review. *PloS One*, 15(4), e0232258. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232258>
- Van Horne, Y. O., Farzan, S. F., Razafy, M., & Johnston, J. E. (2022). Respiratory and allergic health effects in children living near agriculture: A review. *Sci Total Environ*, 832, 155009. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155009>
- Wageningen Food Safety Research*. (2019, May 29). WUR. <https://www.wur.nl/en/research-results/research-institutes/food-safety-research.htm>
- Wijga, A. H., Kerkhof, M., Gehring, U., de Jongste, J. C., Postma, D. S., Aalberse, R. C., Wolse, A. P., Koppelman, G. H., van Rossem, L., Oldenwening, M., Brunekreef, B., & Smit, H. A. (2014). Cohort profile: The Prevention and Incidence of Asthma and Mite Allergy (PIAMA) birth cohort. *International Journal of Epidemiology*, 43(2), 527–535. <https://doi.org/10.1093/ije/dys231>
- Yang, H.-H., Paul, K. C., Cockburn, M. G., Thompson, L. K., Cheng, M. Y., Suh, J. D., Wang, M. B., & Lee, J. T. (2023). Residential Proximity to a Commercial Pesticide Application Site and Risk of Chronic Rhinosinusitis. *JAMA Otolaryngology-- Head & Neck Surgery*, 149(9), 773–780. <https://doi.org/10.1001/jamaoto.2023.1499>