



Improve our understanding of Persistent Organic Pollutants transfer from the feed and soil to the Swiss beef meat – MeatPOP

Project final report – November 2021

Reference / Case number: lesy

This final report establishes the finalization of the MeatPOP project.

In order to better understand and quantify the global fate of persistent organic pollutants (POPs) from the rearing environment to the bovine meat, the aims of the project MeatPOP are to:

- i) Quantify the POPs exposure level of suckling cows and calves in Switzerland,
- ii) Implement a mechanistically model of POPs fate in growing cattle.

The task 2 “Mechanistic modelisation of POPs fate in growing cattle” was accomplished in 2020 and main outcomes described in the MeatPOP intermediary report of November 2021. A congress communication was done based on this task in December 2020 (25^{ème} Rencontres Recherches Ruminants, 2-3 December 2020, online meeting; Albechalaany *et al.*, 2020, **Annex 3**, in French). A second congress communication is planned for the next year at the DIOXIN 22 congress (9-13 October 2022, New-Orleans, USA).

The task 1 “Quantify the POPs exposure level of suckling cows and calves in Switzerland” was performed in the summer 2021. As planned, we hired a 3 months internship (Agathe Vaille) to support us in this task. First, disperse databases needed for the estimation of suckling herd POPs exposure were gathered and merged. Those include:

- a) typical rations for suckling cows and growing cattle used in Switzerland; information gathered at the “Vache-mère Suisse” association,
- b) range of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PCDD/Fs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) concentrations in feedstuffs entering into ruminant diet; databases gathered at the Agroscope Feed Control unit and Federal Food Safety and Veterinary Office,
- c) additional POPs exposure through soil ingestion with:
 - range of soil ingestion level at pasture and through hay and silage depending on pasture or harvest practices; from existing scientific literature,
 - range of PCDD/Fs and PCBs concentrations in Swiss agricultural soils: NABO database of agricultural soil composition and pollution, Schaffhausen canton and Empa.

Secondly, calculations were performed in order to estimate the PCDD/Fs and PCBs levels of typical suckling cow rations in Switzerland according to several scenarios. This includes i) the type of ration depending on geographical area (plain, hill, mountain) or feeding practices (farms using concentrates feedstuffs), ii) the level of soil intake depending on pasture management and harvest conditions (1 to 9% of the total dry matter intake) and iii) the background environmental contamination level (median, 3rd quartile or 9th decile of the distribution of feedstuff and soil POP contamination levels).

Lastly, the POP congeners profile in the several rations were combined with bioconcentration factors from oral intake to beef meat gathered from a previous study (Driesen *et al.*, 2021)¹, in order to estimate the

¹Driesen C., Zennegg M., Morel I., Hess H.D., Nowack B., Lerch S. 2021. Average transfer factors are not enough: The influence of growing cattle physiology on the transfer rate of polychlorinated biphenyls from feed to adipose. *Chemosphere*, 270:129698.

ration POP contamination level to not overpass to ensure the production of meat lower than the POP regulatory limits.

A summary of the results for the “dioxin-like” PCBs (dl-PCBs) is described in the **Annex 1**, whereas the full details including PCDD/Fs and “non dioxin-like” PCBs (ndl-PCBs) results and POP congener profiles in the several rations are available in the internship report of Agathe Vaille (**Annex 2**, in French). Full dataset and details of calculations are implemented in xlsx files and available on request. A first valorization of the results will be published at the end of November 2021 as a technical article in the “die Mutterkuh” journal (issue 4/2021, Vaille and Lerch, 2021², in French and German). A second congress communication is planned for the next year at the DIOXIN 22 congress (9-13 October 2022, New-Orleans, USA).

For Agroscope:

Dr. Sylvain Lerch and Dr. Frigga Dohme-Meier
Project leader and head of ruminants research group, respectively

Posieux, November 05, 2021

²Vaille et Lerch, 2021. Evaluation du risque de contamination aux PCBs des vaches mères. la vache mère 21-4, *In Press*.

Annex 1:

Task 1: Quantify the POPs exposure level of suckling cows and calves in Switzerland

Based on the internship report of Agathe Vaille (Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Toulouse, France)

Advisor: Sylvain Lerch (Agroscope)

Over the past 20 years, Swiss monitoring plans of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PCDD/Fs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) levels in beef meat of suckling husbandry revealed occasional exceedances of the regulatory maximum levels. In 2012, out of 60 meat samples, 5.7% exceeded the regulatory maximum limit and about 50% exceeded the action level (FOPH, 2012). Part of these cases of contamination could be attributed to PCDD/F and PCB diffuse sources of exposure, related to the ingestion of ration and soil.

The aim of the current study was to assess the exposure level to PCDD/Fs and PCBs of suckling cows in Switzerland via feed and soil ingestion. Results for "dioxin-like" PCBs (dl-PCBs) are outlined below. Full details including PCDD/Fs and "non dioxin-like" PCBs (ndl-PCBs) calculations and POP congener profiles in the several rations are available in the internship report of Agathe Vaille (**Annex 2**, in French).

1. Collection of databases and calculations of dl-PCBs exposure level

The **Figure 1** shows the overall workflow of the study, which was based on the merging of numerous databases. These combine data on typical feeding systems of suckling cows in Switzerland (Iten, 2012), soil ingestion rate at pasture (Jurjanz *et al.*, 2012), as well as on dl-PCB contamination levels of forages (source: FSVO), concentrated feeds (source: Official Feed Control Unit, Agroscope) and agricultural soils (sources: NABO database, Agroscope; Empa and Schaffhausen canton). Forages and concentrates showed "environmental back-ground" PCB levels due to atmospheric deposition of these pollutants, which are easily dispersed and carried by air. Soil is the sink for PCBs in terrestrial environment, due to binding on soil organic matter (high hydrophobicity) and long elimination half-life (low degradability). Punctual sources of exposure (e.g. contaminated materials and equipment in the barn, accidentally contaminated feedstuff) are not considered. Moreover, respiratory and water intake exposure routes are considered negligible (PCBs being non-volatile and hydrophobic).

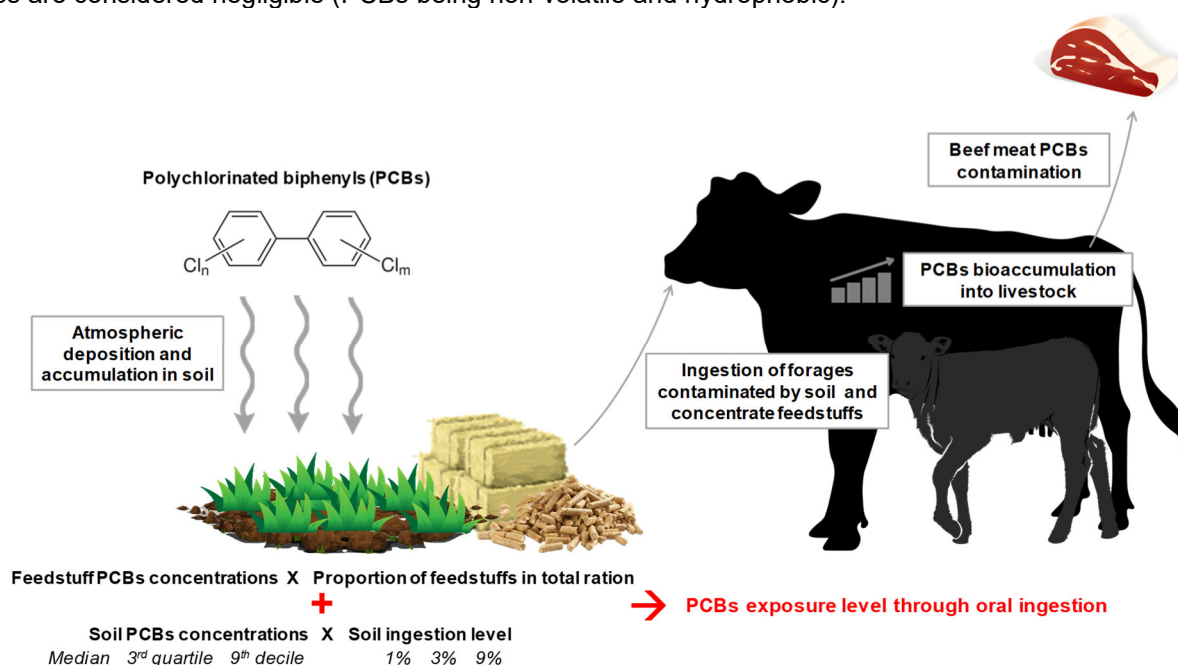


Figure 1: PCBs diffusive exposure routes in suckling cow and rationale of the exposure estimative calculations

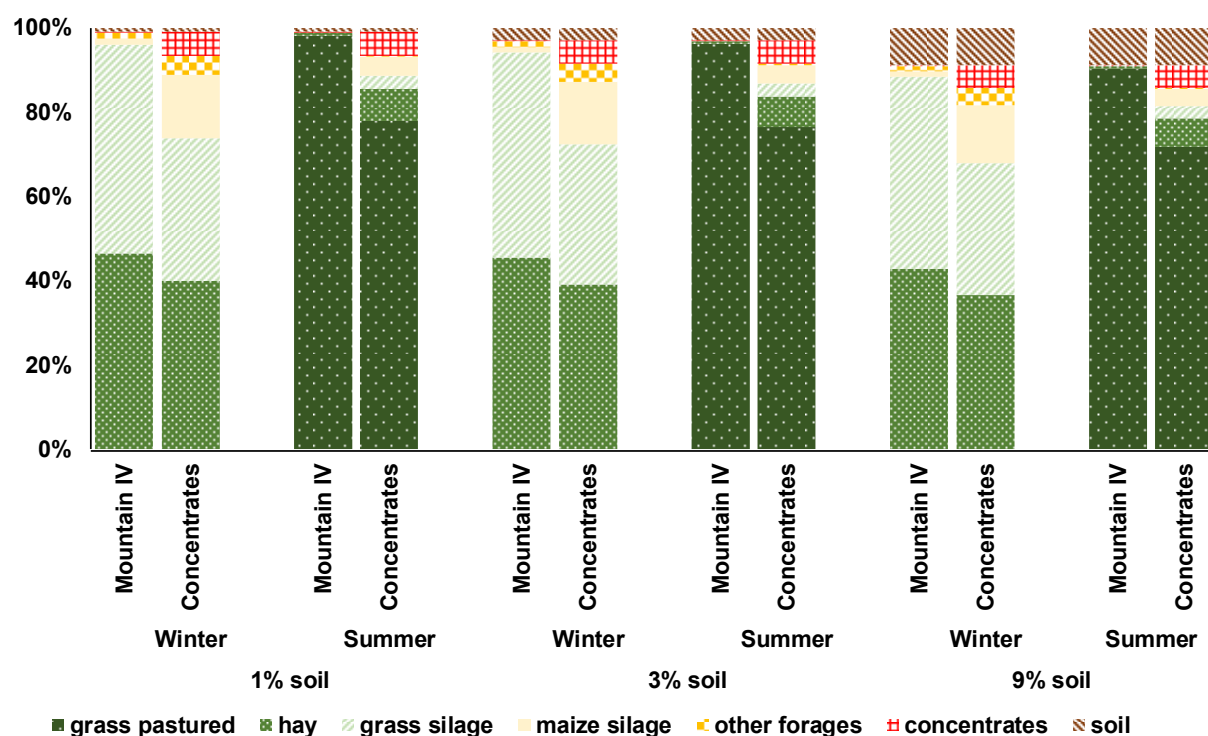


Figure 2: Composition of typical winter and summer feed rations of suckling cows in Switzerland for the « Mountain IV » area and the farms using concentrate feedstuffs according to 3 scenarios of soil ingestion levels (in dry matter basis), source: Iten, 2012

Through the survey of 475 suckling cow farms performed by the association “Vache-mère Suisse” (Iten, 2012), seven typical summer-pasture and winter-barn feeding systems were distinguished. Only the cases of the Mountain area IV and of farms that used concentrate feedstuffs are presented. The Mountain IV feeding system is the richest in grass-based forages and the Concentrate system is the richest in corn silage and concentrate feedstuffs, although it remain mostly based on grass (**Figure 2**).

Soil ingestion level was considered according to three scenarios: 1, 3 and 9% of dry matter intake. One percent when conditions are optimal, i.e., grass is available in sufficient amount, stocking rate is low to moderate. Conversely, when such conditions are not favorable, soil ingestion may reach 3%, or even 9% in the worst case (Jurjanz *et al.*, 2012). The proportions of each ingested matrix (grazed grass, hay, grass or maize silages, other forages, concentrates and soil) for each feeding system and soil ingestion scenario were subsequently multiplied by their PCB concentrations. The PCB contamination levels were estimated according to three risk scenarios: median, 3rd quartile and 9th decile.

2. dl-PCBs levels in feedstuffs, soil and total rations

The **Figure 3** illustrates the distribution of dl-PCB contamination levels in the various feedstuffs and in soil after merging all the available data. Median dl-PCB concentrations in soils is 10-fold higher than in feedstuffs. Within the 6 feedstuff categories, PCB concentrations in fresh grass, grass silage and hay are somewhat higher than in maize silage (1.6-fold higher), concentrates (5-fold) or other forages (5-fold). This is presumably because herbage grazed or harvested close from the ground level is more likely to contain soil particles and therefore PCBs than other feedstuff categories. The **Figure 4** illustrates the sum of dl-PCB concentrations of the several feeding systems, soil ingestion levels and risk scenarios. Whatever the scenario, dl-PCB contamination of the ingested rations (feedstuffs + soil) never exceeds the maximum regulatory limit for feed.³ However, it can reach a level close to the action level, when the scenario 9th decile and 9% soil in total dry matter intake is considered. This result appears reassuring, but may hide a risk of meat contamination for the 3rd quartile and 9th decile scenarios. Indeed, based on the use of dl-PCB bioconcentration factors from oral intake to beef meat (Driesen *et al.*, 2021), these scenarios seems to present risks of meat dl-PCB contamination above the maximum regulatory limit.

³Kontaminantenverordnung (VHK) Stand 1. Mai 2017

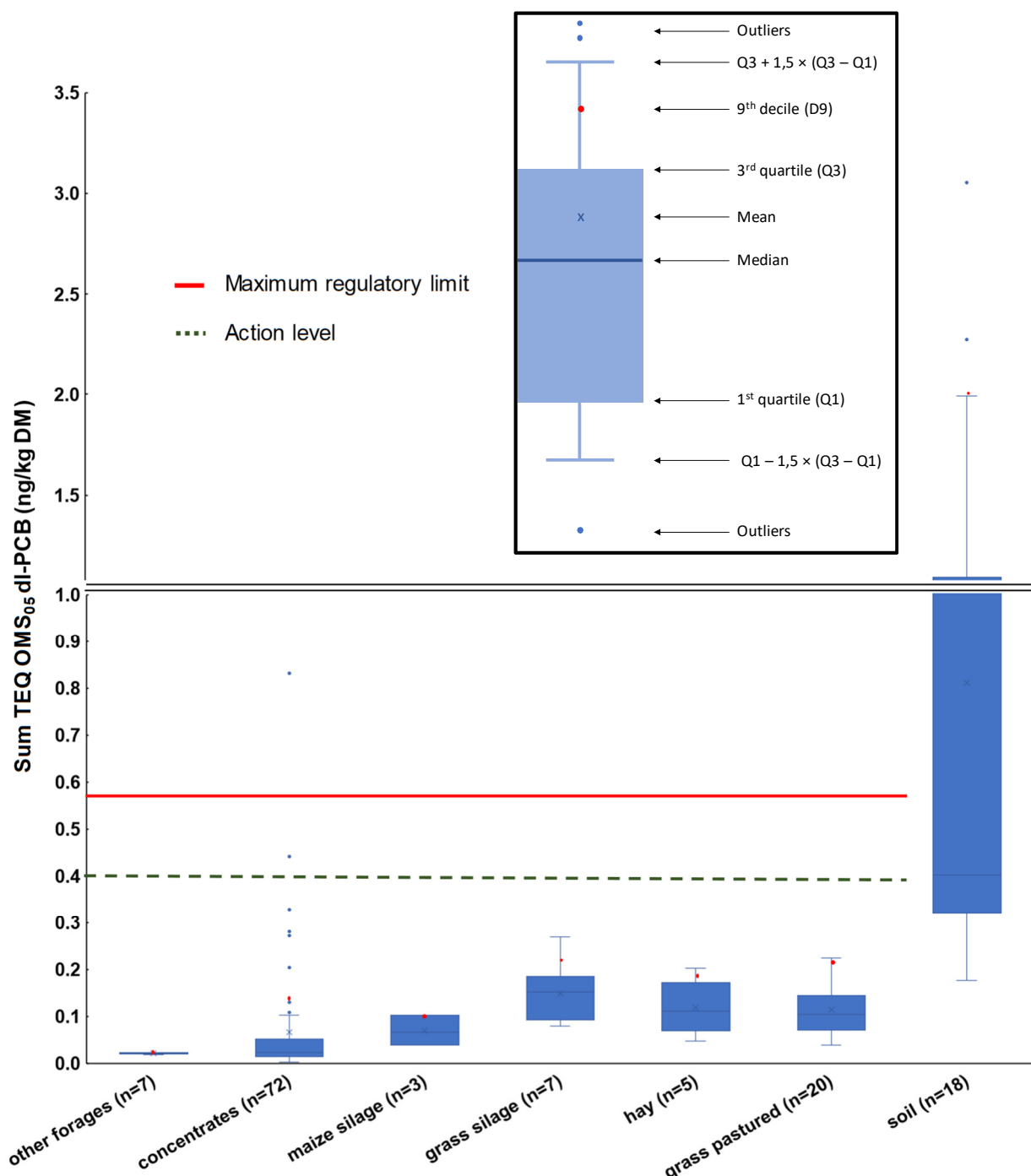


Figure 3: Mid-bound dl-PCB concentrations distribution in the 6 categories of feedstuffs entering into suckling cow feed rations and of agricultural soils of Switzerland. Maximum regulatory limit and action level are expressed on dry matter basis (regulatory values of 0.50 and 0.35 ng TEQ/kg feed at 12% moisture, see Table 4 of Annex 2).

3. Limitations and implications of the study, and future research trends

The only small number of data collected concerning the levels of dl-PCBs in feedstuffs (maize and grass silages and hay especially) and soil shorten the broad genericity of the present preliminary results. To fill such knowledge gaps, it is needed to expand and centralize federal, cantonal, and livestock industry POP monitoring plans. In such attempt, it is mandatory to focus not only on concentrate feedstuffs for reglementary purposes (i.e. federal official feed control annual campaigns), but also on grass-based forages and grassland soils.

Unless such limitation, our preliminary results highlight that soil is one of the main source of diffuse exposure to PCBs of suckling cow in extensive grass-based feeding systems. It is therefore important to prevent diffusive contamination by limiting such soil ingestion exposure route as much as possible. Numerous precautionary measures have been listed and disseminated recently to the livestock sector (Agridea, 2021). In some specific cases, these measures may not be sufficient to prevent accidental contamination, e.g. when farm is located in an area where soil is contaminated above a specific level.

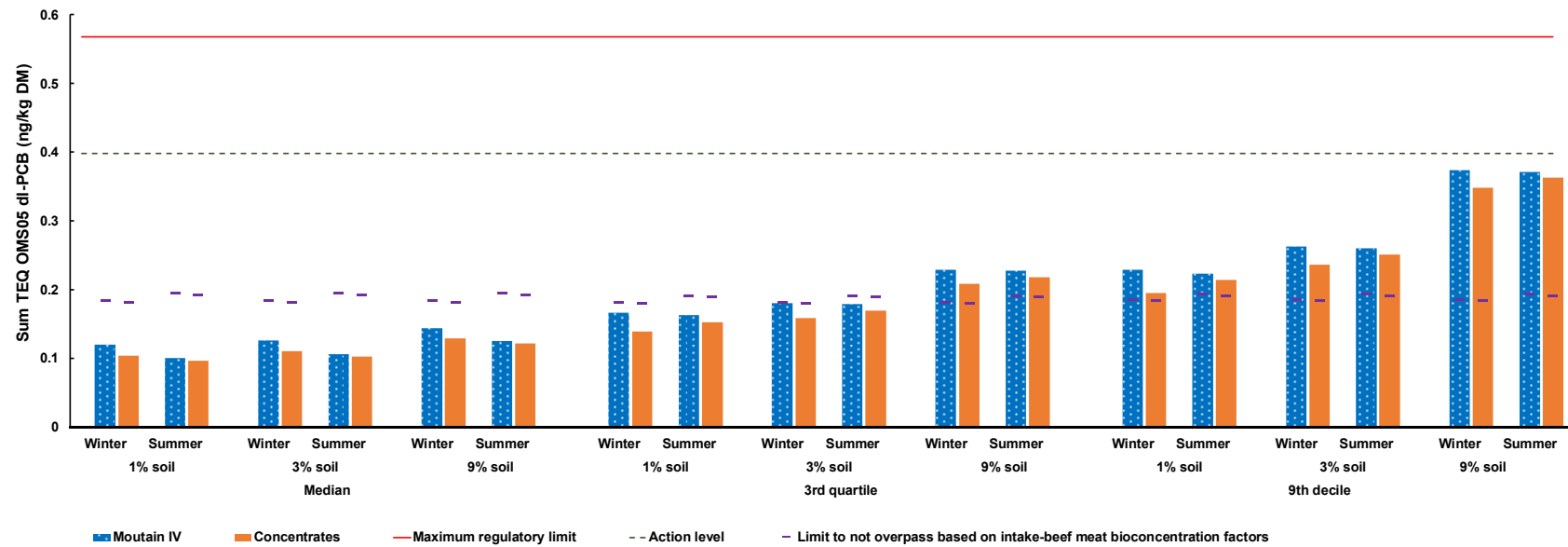


Figure 4: Mid-bound dl-PCB concentrations of the several feeding systems (Mountain IV, Concentrates), soil ingestion levels (1, 3, 9%) and risk scenarios (median, 3rd quartile, 9th decile)

Future research trends include, the integration of such exposure estimates into mathematical models describing the fate of POP in suckling cow and calf developed in the framework of the AgroPOP and MeatPOP projects (Albechaalany *et al.*, 2020, Bogdal *et al.*, 2017, Lerch *et al.*, 2018). It will thus be feasible to describe the global transfer of POPs from the rearing environment to the beef meat. Together, this will help in improving the methodologies used by federal and cantonal safety authorities to assess and manage the risks of exposure of livestock to environmental pollutants. It will further support farmers in case of herd contamination incident.

Acknowledgements

Authors would like to thanks M. Hans-Möevi of the “Vache-mère Suisse” association, C. Clément (Official Feed Control Unit), D. Wächter (Swiss National Soil Observatory) and P. Schlegel (Ruminants Research Unit) of Agroscope, M. Zennegg and C. Driesen from Empa, L. Klauser from FSVO and J. Sägger from Schaffhausen canton for kindly providing the databases needed for the estimates of PCB exposure levels of suckling cows.

References

- Agridea, 2021. Les PCB dans l'élevage causes et mesures. Publications – Production animale – Production laitière, élevage et engraissement. Ed. Agridea, Lindau. 16.07.2021, 8 pp. Disponible en ligne : <https://agridea.abacuscity.ch/fr/A~3875~1/3~420100~Shop/Publications/Production-animale/Production-laiti%C3%A8re-%C3%A9levage-et-engraissement/Les-PCB-dans-l%C3%A9levage-causes-et-mesures/Allemand/Print-papier>.
- Albechaalany J., Loncke C., Driesen C., Schmidely P., Ortigues-Marty I., Agabriel J., Zennegg M., Sauvant D., Lerch S. 2020. Modèle mécaniste du transfert des contaminants lipophiles chez le bovin en croissance. 25^{ème} Rencontres Recherches Ruminants. 02.12.2020, Ed. INRAE / Idele, Paris. p. 477.
- Bogdal C., Züst S., Schmid P., Gyalpo T., Zeberli A., Hungerbühler K., Zennegg, M. 2017. Dynamic transgenerational fate of polychlorinated biphenyls and dioxins/furans in lactating cows and their offspring. Environmental Science and Technology, 51:10536e10545.
- Driesen C, Zennegg M, Morel I, Hess D, Lerch S. 2019. The transfer rate of PCBs from feed to adipose tissue depends on body fatness in growing cattle. Orga Comp, 81:128-131.
- FOPH, 2012. Dioxines et PCB dans la viande de bœuf issue d'une production naturelle. Office fédéral de la santé publique, pp. 1-4.
- Iten A., 2012. Résultats de l'enquête sur l'alimentation. la vache mère, 12(4): 13-15.
- Jurjanz S., Feidt C., Pérez-Prieto L.A., Ribeiro Filho H. M. N., Rychen G., Delagarde R., 2012. Soil intake of lactating dairy cows in intensive strip grazing systems. Animal, 6(8): 1350–1359.
- Lerch S, Martin O, Fournier A, Henri J. 2018. Exploring the effects of dietary lipid content and digestibility on lipophilic contaminants transfer from feed to milk in dairy cows: insights from a physiologically-based toxicokinetic modelling approach. In 10th Int Symp Nutr Herb. Adv Anim Biosci, 9(3):444.

Annex 2:

Internship report of Agathe Vaille (Ecole Nationale Supérieure d'agronomie de Toulouse, France)

« Quantification de l'exposition aux PCDD/Fs et PCBs issus de sources environnementales diffuses des troupeaux de vaches allaitantes suisses » (In French)

Stage de découverte professionnelle

Quantification de l'exposition aux PCDD/Fs et PCBs issus de sources environnementales diffuses des trou- peaux de vaches allaitantes suisses



Maître de stage :

Sylvain Lerch

PhD, MSc, Dipl. Ing. Agr.

Collaborateur scientifique

Domaine stratégique de recherche systèmes de produc-
tion animaux et santé animale

Groupe de recherche ruminants

sylvain.lerch@agroscope.admin.ch

 **Agroscope**

Centre de compétence de la Confédération Suisse

Département fédéral de l'économie DFE

Station de recherche de Posieux

Rte de la Tioleyre 4, 1725 Posieux (Suisse)

+41 5 84 66 71 11

Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse ENSAT

Av. de l'Agrobiopole, 31326 Auzeville-Tolosane (France)

+33 5 34 32 39 00



Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur Sylvain Lerch pour m'avoir accueillie au sein de la station de recherche d'Agroscope Posieux et pour m'avoir encadrée tout au long de mon stage. Ses conseils avisés et ses connaissances m'ont été d'une aide précieuse dans la réalisation de ce stage. Je tiens également à le remercier pour m'avoir permis de participer à un essai expérimental à La Frêtaz, ainsi que pour m'avoir permis de prendre part à d'autres types de manipulations au sein du centre de recherche.

Je tiens également à remercier particulièrement Monsieur Roland Cotting pour son accueil chaleureux et sa bienveillance tout au long de mon séjour.

Je remercie Mme Isabelle Morel pour m'avoir supervisée lors de l'essai expérimental à La Frêtaz et pour m'avoir apportée son aide lors de la réalisation de mon projet.

Je tiens également à remercier l'ensemble des chercheurs de la station de Posieux qui ont pris le temps de me faire part de leurs projets. Mais aussi l'ensemble du personnel de laboratoire, de la ferme et de l'abattoir pour m'avoir présenté leur travail et pour m'avoir permis de participer à quelques manipulations.

Enfin, je tiens à remercier Madame Cécile Bonnefont pour avoir accepté d'être ma tutrice ENSAT lors de ce stage et pour m'avoir aiguillée dans la réalisation de celui-ci.

Table des matières

Introduction.....	1
A. Présentation de la structure d'accueil.....	1
B. Projet MeatPOP : Améliorer la sécurité sanitaire de la viande bovine suisse vis-à-vis des polluants organiques persistants (POPs).....	3
Le projet MeatPOP.....	5
I. Présentation du projet MeatPOP.....	5
1. Le contexte de l'étude.....	5
2. Les objectifs et missions du projet.....	9
II. Matériels et méthodes.....	10
1. Construction de la base de données.....	11
1.1. Rations offertes aux vaches allaitantes selon différentes zones géographiques de Suisse.....	11
1.2. Concentrations en PCDD/Fs et PCBs des aliments composant la ration offerte aux vaches allaitantes.....	12
1.3. Taux d'ingestion de sol par les bovins.....	13
1.4. Concentrations en PCDD/Fs et PCBs des sols agricoles suisses.....	13
2. Calculs à partir de la base de données.....	14
2.1. Considération de trois différents scénarios de contamination.....	14
2.2. Limite de concentrations en PCDD/Fs et PCBs à ne pas dépasser dans la ration des vaches allaitantes suisses.....	14
2.2.1. Cas du lait.....	14
2.2.2. Cas de la viande.....	15
III. Résultats & Discussions.....	16
1. Sélection et traitement des données.....	16
1.1. Rations offertes aux vaches allaitantes selon différentes zones géographiques de Suisse.....	16
1.2. Concentrations en PCDD/Fs et PCBs des aliments composant les rations offertes aux vaches allaitantes et des sols agricoles de Suisse.....	17
2. Quantification de l'exposition aux PCDD/Fs et PCBs issus de sources environnemen- tales diffuses des troupeaux de vaches allaitantes suisses.....	18
IV. Critiques méthodologiques.....	19
1. Effectifs limitants concernant les données de concentrations en PCDD/Fs et PCBs des aliments composant les rations de vaches allaitantes.....	19
2. Incertitudes liées au taux d'ingestion de sol par les bovins.....	20
3. Effectifs limitants concernant les données de concentrations en PCDD/Fs et PCBs des sols agricoles de Suisse.....	20

4. Limitations liées à l'extrapolation des taux de transfert de la ration vers le lait depuis le cas des vaches laitières vers celui des vaches allaitantes.....	21
--	----

V. Conclusion et perspectives.....	22
---	-----------

Conclusion.....	24
------------------------	-----------

Bibliographie.....	25
---------------------------	-----------

Annexes.....	29
---------------------	-----------

Liste des abréviations et lexique

AL : Niveau d'action. Seuil de concentration en polluant dans l'aliment pour les animaux ou l'homme à partir duquel des mesures doivent être prises pour contrôler voire éliminer lorsque cela est possible la source de contamination en polluant.

BCF : Facteur de bioconcentration. Ratio entre la concentration en polluants dans le tissu d'intérêt et celle dans la ration ingérée.

Cendres iHCl : Cendres insolubles dans l'acide chlorhydrique. Il s'agit du résidu insoluble demeurant après l'incinération d'un échantillon dans un four à $525\text{ °C} \pm 25\text{ °C}$ et le traitement des cendres avec de l'acide chlorhydrique. Ces cendres insolubles dans l'acide sont constituées principalement de silice et de silicates.

Demi-vie d'élimination : Durée à l'issue de laquelle la moitié de l'élément considéré est éliminée.

dI-PCBs : Dioxin-Like PolyChloroBiphényles

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

HCB : HexaChloroBenzène

HCH : HexaChlorocycloHexane

LOD : Limite de Détection

MG : Matière Grasse

ML : Limite maximale réglementaire. Limite de concentration en polluant dans l'aliment pour les animaux ou l'homme fixée par le droit sur les denrées alimentaires à partir de laquelle un produit ne peut plus être commercialisé.

MO : Matière Organique

MS : Matière Sèche

NABO : Observatoire National des sols suisses

ndI-PCBs : Non-Dioxin-Like PolyChloroBiphényles

OFAG : Office Fédéral de l'Agriculture

OFSP : Office Fédéral de la Santé Publique

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

OSAV : Office fédéral de la sécurité alimentaire et des affaires vétérinaires

PBTK : Modèle toxicocinétique à base physiologique

PCBs : PolyChloroBiphényles

PCDDs : PolyChloroDibenzoDioxines

PCDD/Fs : PolyChloroDibenzo-Dioxines et -DibenzoFuranes

PCDFs : PolyChloroDibenzoFuranes

POPs : Polluants Organiques Persistants. Molécules listées au sein des annexes de la convention de Stockholm et définies selon quatre propriétés que sont : la toxicité, la persistance dans l'environnement, la bioaccumulation, et leur dispersion et transport sur de longues distances.

TEQ : Equivalent Toxicologique

TEF : Facteur d'Equivalent Toxique. Coefficient international défini par l'OMS et affecté à chaque congénère d'une famille de polluants dont la valeur dépend du risque encouru par l'humain en cas d'ingestion.

TR : Taux de transfert. Ratio entre la quantité de polluants excrétée dans le lait ou l'œuf et la quantité de polluants ingérée oralement.

UE : Union Européenne

Table des illustrations

Figures

Figure 1 : Localisation des sites d'Agroscope en Suisse

Figure 2 : Schéma du périmètre de l'Agrochaine de la vache allaitante

Figure 3 : Profil d'exposition via l'alimentation aux PCBs et dioxines de la population suisse pour un total d'environ 1,75 pg TEQ/kg de poids corporel/jour

Figure 4 : Schéma des flux de POPs impliqués dans l'agrochaine de la vache allaitante suisse en zone de montagnes en été

Figure 5 : Schéma des acteurs impliqués dans l'Agrochaine de la vache allaitante suisse et des relations entre ces acteurs

Figure 6 : Schéma détaillé des étapes de création et de calculs de la base de données

Figure 7 : Proportions des six catégories d'aliments dans les rations types de vaches allaitantes de la zone « Montagne IV » et des élevages utilisant des Concentrés, sans ou avec 1% ou 9% de sol dans la MS ingérée

Figure 8 : Distribution des concentrations pour la somme des PCDD/Fs des six catégories d'aliments composant les rations des vaches allaitantes et des sols agricoles de Suisse

Figure 9 : Distribution des concentrations pour la somme des dl-PCBs des six catégories d'aliments composant les rations des vaches allaitantes et des sols agricoles de Suisse

Figure 10 : Distribution des concentrations pour la somme des ndl-PCBs des six catégories d'aliments composant les rations des vaches allaitantes et des sols agricoles de Suisse

Figure 11 : Concentrations pour les sommes des PCDD/Fs, dl-PCBs et ndl-PCBs des rations d'élevages de vaches allaitantes de zones de montagne IV (« Bergzone IV ») et d'élevages utilisant des concentrés (« Ration concentrés »)

Figure 12 : Compétences ENSAT, requises, mobilisées, et acquises lors de ce stage

Figure 13 : Cycle de Kolb ciblant le cas particulier de la rigueur dans le traitement des données

Figure 14 : Matrice SWOT des forces/faiblesses et opportunités/menaces d'Agroscope identifiées lors du stage

Tableaux

Tableau 1 : Données issues de la littérature et de sources personnelles pour la construction de la base de données

Tableau 2 : Données issues de la littérature et de sources personnelles pour la synthèse de données concernant les concentrations en PCDD/Fs et PCBs des aliments pour animaux suisses

Tableau 3 : Données issues de la littérature et de sources personnelles pour la base de données sur les concentrations en PCDD/Fs et PCBs des sols agricoles suisses

Tableau 4 : Limites maximales réglementaires (ML) et niveaux d'action (AL) pour les différentes catégories d'aliments pour l'alimentation animale ou humaine selon la réglementation suisse et de l'union européenne

Tableau 5 : Taux de transfert moyens vers le lait et les œufs des PCDD/Fs

Tableau 6 : Taux de transfert moyens vers le lait et les œufs des PCBs

Tableau 7 : Facteurs de bioconcentration des PCBs selon la ration, la proportion de lipides dans la carcasse et le taux de croissance

Tableau 8 : Mesures de précaution pour réduire les contaminations en PCBs pour l'ensemble des exploitations de production de viande basée sur les herbages et l'élevage allaitant

Tableau 9 : Mesures de réduction des contaminations en PCBs critiques pour les exploitations de production de viande basée sur les herbages et l'élevage allaitant

Abstract

The quantification of the exposure to the polychlorinated dibenzo-dioxins and -furans (PCDD/Fs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) from environmental diffusive sources of Swiss suckling cow herds has been estimated by collecting and merging nearly seventeen databases from scientific publications and internal documentation from the federal administration, the cantons and the Swiss Mother Cow Association. Exposure through feed (forages and concentrates) and soil ingestion to seventeen PCDD/Fs, twelve dioxin-like PCBs (dl-PCBs) and six non-dioxin-like PCBs (ndl-PCBs) regulated in food and feed was considered. Typical cases of seven feeding systems for suckling cows practiced in Switzerland were studied for the winter and grazing periods and corresponding to mountain areas (n=4), lowland areas, hilly areas and farms using concentrates [on average 5-6% of dry matter (DM) intake]. Three levels of soil intake were assumed, 0%, 1% and 9% of DM intake, corresponding to different rearing conditions. The concentration's distribution of each of the PCDD/Fs and PCBs congeners in feedstuffs was characterized for the six categories reported in the suckling cow rations: fresh grass, hay, grass silage, corn silage, concentrates and an "other" category (mostly roots and tubers and molasses...). The PCDD/Fs and PCBs concentration's distribution of Swiss agricultural soils was determined from data on different rural and agricultural soils. From these feedstuffs and soil distributions, median, third quartile (Q3) and ninth decile (D9) exposure scenarios were calculated for each feeding system and soil ingestion level. The results of this work show a risk of exceeding regulatory maximum limits in meat or milk from suckling cows for some scenarios. These scenarios are cases where soil ingestion is high (3% and 9% of DM intake) and the feed and soil contaminated beyond the median level (scenarios Q3 and D9). In conclusion, this study highlights that when point sources (e.g. contaminated materials and equipment, accidentally contaminated concentrated feed) are excluded, the largest source of exposure to persistent organic pollutants (POPs) remains soil ingestion. Various levers of action must be implemented to limit this diffuse chemical risk for livestock sites, especially when soils contamination levels are above the median environmental background. It is therefore mandatory to strengthen the advice and training of farmers on good agricultural practices in order to avoid critical scenarios.

Mots clefs : Sécurité sanitaire de la viande · Ingestion de sol · Polluants Organiques Persistants (POPs) · Evaluation du risque · Elevage extensif ·

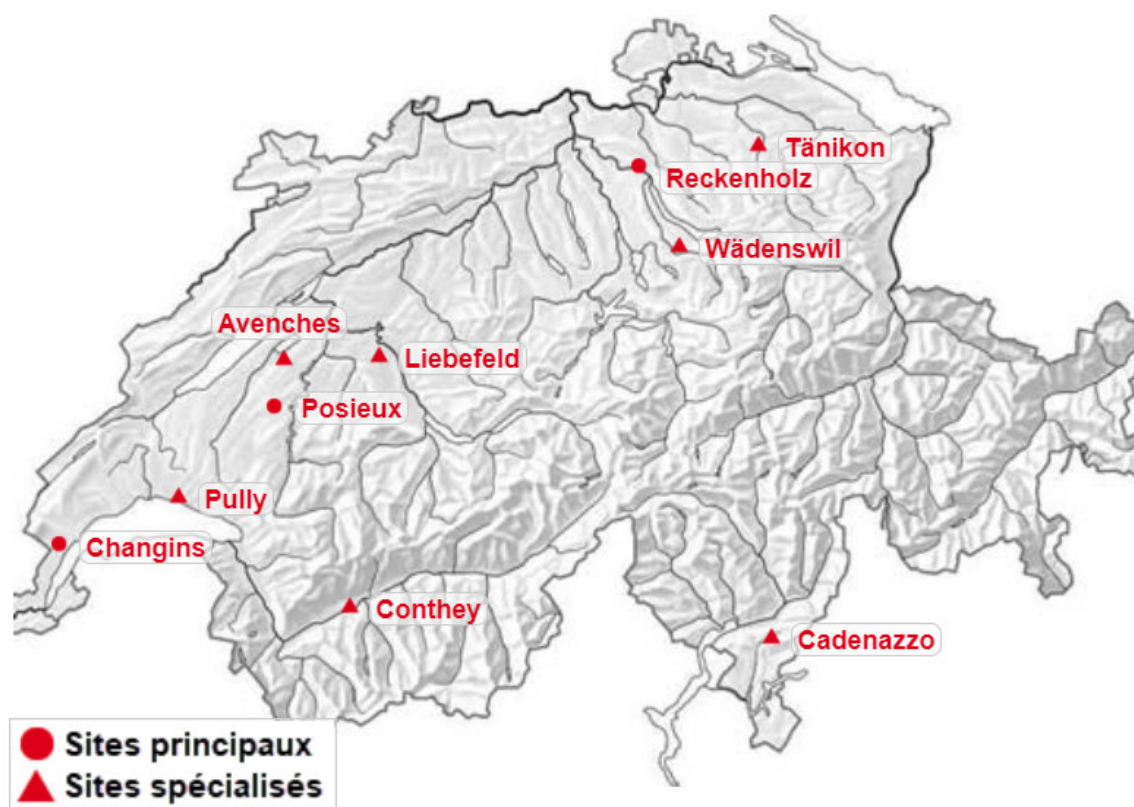


Figure 1 : Localisation des sites d'Agroscope en Suisse

Source : Agroscope, 2021

Introduction

A. Présentation de la structure d'accueil

Agroscope est le centre de compétences de la confédération helvétique pour la recherche et le développement dans les secteurs de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de l'environnement. Agroscope fait partie intégrante de l'Office fédéral de l'Agriculture (OFAG) et est géré par la Confédération Suisse.

L'objectif d'Agroscope est « d'apporter une contribution importante à une filière agroalimentaire durable et à un environnement préservé, contribuant ainsi à une meilleure qualité de vie pour tous » (OFAG, 2021). Les travaux d'Agroscope englobent « la recherche pour le développement des politiques sectorielles de l'agriculture et du secteur agroalimentaire et pour la pratique ; la recherche et le développement de produits et de méthodes pour les acteurs de l'agriculture et du secteur agroalimentaire suisses ; ainsi que le transfert de savoir et de technologie. En outre, Agroscope accomplit des tâches d'exécution dans le cadre des prescriptions légales et soutient l'OFAG sous la forme d'aides à l'exécution (OFAG, 2021). Les projets AgroPOP et MeatPOP s'inscrivent pleinement au sein de ces objectifs en contribuant à une meilleure maîtrise de la qualité sanitaire chimique des produits d'élevage bovins. Le volet du projet MeatPOP, qui fait l'objet du présent rapport de stage, permet plus spécifiquement de fournir des connaissances utiles à la réduction des risques d'exposition aux polluants organiques (POPs) des troupeaux de vaches allaitantes.

Agroscope est basé sur dix sites répartis sur le territoire Suisse (voir figure 1). Cela permet de disposer d'une infrastructure décentralisée mais aussi de tenir compte des différences régionales du système agroenvironnemental (Agroscope, 2021). C'est au sein de ces sites que sont répartis trois domaines de compétences pour la technologie de recherche et le transfert de connaissances (Animaux, produits d'origine animale et Haras national suisse ; Plantes et produits d'origine végétale ; Développement de méthodes et analytique), et sept domaines stratégiques de recherche (Amélioration des plantes ; Systèmes de production Plantes ; Protection des végétaux ; Systèmes de production Animaux et santé animale ; Systèmes microbiens des denrées alimentaires ; Agroécologie et environnement ; Compétitivité et évaluation des systèmes) (Agroscope, 2021).

La station d'Agroscope Posieux, où j'ai effectué mon stage, concentre une partie des deux domaines de compétences « Animaux, produits d'origine animale et Haras national suisse » et « Développement de méthodes et analytique » ainsi que du domaine stratégique de recherche « Systèmes de production Animaux et santé animale ». Mon stage s'est déroulé du 31 mai au 13 août 2021. Celui-ci a été encadré par Sylvain Lerch, collaborateur scientifique dans le domaine stratégique de recherche « systèmes de production animaux et santé animale », plus précisément au sein du groupe de recherche « ruminants ». Durant ce stage, j'ai collaboré à la réalisation du projet MeatPOP en étudiant la problématique suivante : « Quantification de l'exposition aux PCDD/Fs et PCBs issus de sources environnementales diffuses des troupeaux de vaches allaitantes suisses ».

Ce stage m'a permis de découvrir le milieu professionnel, d'acquérir des repères et de comprendre le fonctionnement d'une organisation. Il s'agit également d'une opportunité pour certifier son projet professionnel ou pour découvrir de nouveaux domaines d'intérêt. Eprouvant un certain intérêt pour la recherche dans le domaine de l'élevage et envisageant de réaliser un doctorat d'université à la suite de l'obtention de mon diplôme d'ingénieur, ce stage s'est donc avéré être en adéquation avec mon projet professionnel.

B. Projet MeatPOP : Améliorer la sécurité sanitaire de la viande bovine suisse vis-à-vis des polluants organiques persistants (POPs)

La consommation de denrées alimentaires d'origine animale est la première source d'exposition aux PolyChloroDibenzo-Dioxines et -DibenzoFuranes (PCDD/Fs) et PolyChloroBiphényles (PCBs) chez l'humain (Hoogenboom R. et al., 2015). Parmi les aliments d'origine animale, les produits de ruminants constituent une part importante de l'exposition aux PCDD/Fs et PCBs. Ainsi, on estime qu'en Suisse près de 18% de l'exposition humaine aux PCBs est due à la consommation de viandes bovines (OFAG, 2019). Malgré les mesures de prévention mises en place, occasionnellement des incidents de contamination continuent de survenir et les POPs demeurent un sujet d'inquiétude majeur pour la santé humaine, mais aussi pour la durabilité des élevages. Une fois émises dans l'environnement par voie atmosphérique, ces molécules se déposent puis s'accumulent dans les horizons supérieurs des sols où elles se lient à la matière organique (MO). En raison de leur résistance aux processus de dégradation biologique et abiotique, ces molécules persistent à long terme dans les sols (ADEME, 2017). En raison de l'ingestion involontaire de sol (pâturage ou via des fourrages souillés lors de leur récolte), les systèmes d'élevage bovins basés sur la consommation d'herbe présentent par conséquent de plus grands risques d'exposition aux POPs.

C'est en réponse à cette problématique d'exposition des humains aux POPs par la consommation de produits d'origine bovine qu'a été mis en place le projet AgroPOP en Suisse en 2017 par Agroscope, en collaboration avec l'Empa et l'école polytechnique fédérale de Zurich. Ce projet vise à mieux comprendre et quantifier la dynamique des POPs dans l'organisme des vaches allaitantes et leurs veaux. La finalité est d'améliorer l'évaluation du risque de transfert des POPs de l'environnement vers la viande et d'assurer la sécurité sanitaire des viandes bovines. En 2020, de nouveaux besoins de connaissances concernant le niveau d'exposition aux POPs des troupeaux de vaches allaitantes ont émergé afin de compléter et d'étendre la portée du projet AgroPOP. Le projet MeatPOP a ainsi été développé.

Ce rapport présente la « Quantification de l'exposition aux PCDD/Fs et PCBs issus de sources environnementales diffuses des troupeaux de vaches allaitantes suisses », un des volets du projet MeatPOP. Il s'agit d'un travail de recueil et de synthèse de bases de données dont l'objectif est d'agréger diverses données éparpillées caractérisant i) les rations types données aux vaches allaitantes selon différentes zones d'élevage en suisse, ii) le taux de contamination en POPs de différentes catégories d'aliments, iii) le taux d'ingestion de sol par les vaches allaitantes suisses, ainsi que iv) le taux de contamination en POPs des sols suisses.

Les dix-sept congénères de PCDD/Fs, douze dioxin-like PCBs (dl-PCBs) et six non-dioxin-like PCBs (ndl-PCBs) faisant l'objet de réglementations sont considérés dans cette étude. Seule l'exposition par voie diffuse des troupeaux par l'alimentation et l'ingestion de sol est intégrée aux calculs. Les voies d'exposition ponctuelles, comme le contact des animaux avec d'anciens matériaux ou équipements (peinture, câbles électriques, condensateur, ...) contenant des POPs, n'est pas considérée. De plus, cette étude vise à estimer le seuil de concentration en POPs à ne pas dépasser dans la ration des vaches allaitantes pour que les niveaux de contamination de leur lait et de leur viande ne dépassent pas la limite maximale réglementaire (ML) pour la consommation humaine. Les résultats de cette étude permettront de définir les niveaux de contamination des rations introduites dans les modèles dynamiques toxicocinétique à base physiologique (PBTK) développés lors du projet AgroPOP afin de prédire le taux de contamination en POPs de la viande et du lait en fonction des conditions d'élevage.

Nous verrons dans un premier temps dans ce rapport une présentation du projet MeatPOP, avec le contexte de l'étude ainsi que les objectifs de la mission de stage.

Dans un second temps nous présenterons les matériels et les méthodes mobilisés.

Enfin dans un troisième temps seront présentés les résultats de l'étude ainsi que leur discussion.

Le projet MeatPOP

I. Présentation du projet MeatPOP

Afin de mieux appréhender la mise en place et le déroulement du projet MeatPOP, une présentation sous la forme de l'agrochaine de la production de viandes issues des troupeaux de vaches allaitantes suisses est proposée avec la problématique suivante : « Le transfert des POPs dans l'agrochaine de la vache allaitante suisse, de l'environnement d'élevage à la viande ».

Le schéma d périmètre de cette agrochaine est présenté figure 2. Les frontières spatiales du champ d'investigation s'étendent en amont du sol, du pâturage de l'herbe et de l'ingestion des fourrages conservés et des concentrés contenant des POPs par la vache, jusqu'en aval u taux de contamination de la viande. Quant au périmètre d'étude, sont considérés certains POPs faisant l'objet d'exigences réglementaires sur la limite à ne pas dépasser dans la viande pour que le produit puisse être commercialisable (i.e. dix-sept PCDD/Fs, douze dl-PCB et six ndl-PCB), et le cas des vaches allaitantes, pour lequel des non-conformités ont été relevées en Suisse et en Allemagne au cours des dix dernières années.

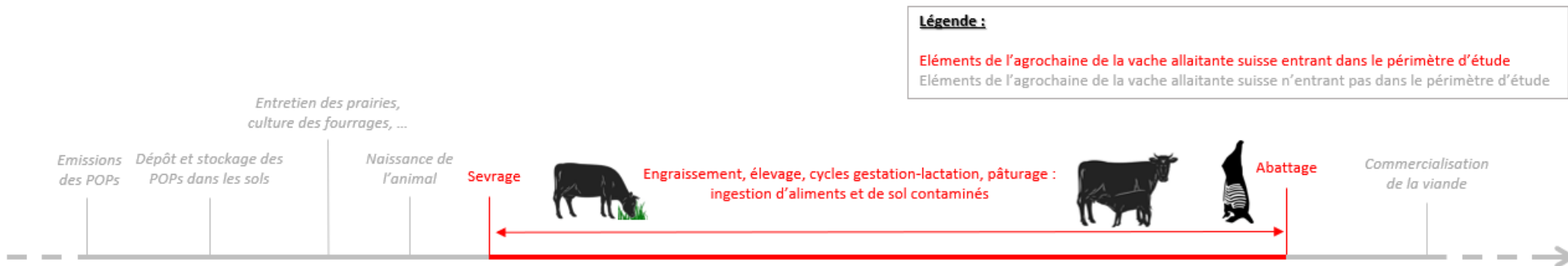


Figure 2 : Schéma du périmètre de l'Agrochaîne de la vache allaitante

Source : personnelle

1. Le contexte de l'étude

Les POPs sont des molécules définies selon quatre propriétés que sont : la toxicité (leur impact sur la santé humaine et les écosystèmes), la persistance dans l'environnement (ces molécules résistent aux dégradations biotiques et abiotiques), la bioaccumulation (elles s'accumulent dans les tissus animaux riches en graisses et leur concentration augmente le long des maillons de la chaîne alimentaire), et leur capacité de transport sur de longues distances (elles peuvent se déposer par voie atmosphérique loin des lieux d'émission, généralement des zones à forte activité humaine vers les pôles) (ADEME, 2017). En raison de leurs propriétés de persistance et de dispersion aisée, ces molécules une fois émises dans les environnements terrestres sont stockées dans les horizons superficiels du sol, chargés en MO. Les POPs sont régulés par deux textes internationaux qui établissent des listes nominatives de POPs : le protocole d'Aarhus, signé en juin 1998 dans le cadre de la convention de Genève et amendé en 2009, puis la convention de Stockholm, signée en mai 2001 dans le cadre de la Commission économique des Nations unies pour l'Europe et entrée en vigueur en 2004 (CITEPA, 2021). Leur objectif est de contrôler, réduire et éliminer les émissions de POPs dans l'environnement. Les substances ont été réparties en trois catégories :

_ les substances produites non intentionnellement par des activités humaines : les dioxines (PolyChloroDibenzoDioxines ou PCDDs), les furanes (PolyChloroDibenzoFuranes ou PCDFs) et les HAPs (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques). Cette famille de polluants comprend divers composés appelés « congénères » qui se distinguent par le nombre et la position des atomes de chlore qui les composent (Bodéan F., Nowak C., 2005). Ces POPs produits involontairement sont issus de combustions incomplètes lors de certains procédés industriels, tels que l'incinération d'ordures ménagères ou encore la métallurgie, mais peuvent également être issus d'événements naturels tels que les feux de forêt ou les éruptions volcaniques (ADEME, 2017), les substances produites intentionnellement comme produits chimiques industriels : les PCBs (PolyChloroBiphényles), HCB (HexaChloroBenzène) et HCH (HexaChlorocycloHexane) par exemple. Parmi les PCBs, on distingue les dl-PCB et les ndl-PCB. Les dl-PCBs possèdent les mêmes propriétés de toxicité et des caractéristiques chimiques semblables à celles des PCDD/Fs. (Bodéan F., Nowak C., 2005). En raison de leurs propriétés physico-chimiques intéressantes, les PCBs ont été massivement utilisés en industrie jusqu'à leur interdiction dans la plupart des pays dans les années 1980. Ils étaient par exemple intégrés dans les peintures ou encore dans des transformateurs électriques. (Etat de Fribourg, 2020),

_ les substances produites intentionnellement comme pesticides : HCB, Endrine, Aldrine, Dieldrine, Toxaphène, Mirex, Chlordane, Chlordécone, Heptachlore, DDT et Lindane. (Bodéan F., Nowak C., 2005).

A la suite d'épisodes de contamination majeurs, l'Office fédéral de la santé publique (OFSP) a mis en place un système de contrôle de la qualité, et le droit suisse sur les denrées alimentaires a fixé des ML de contamination en POPs à partir desquelles les produits alimentaires ne peuvent plus être commercialisés, en accord avec les limites fixées par l'Union Européenne (UE). Ces ML ne concernent que certains POPs parmi ceux énoncés dans la liste de la convention de Stockholm. De plus, un seuil d'action (AL) a également été défini afin d'estimer une limite à partir de laquelle l'éleveur et la filière doivent mettre en place des mesures pour identifier, contrôler voire dans le meilleur des cas éliminer la source de contamination en POPs.

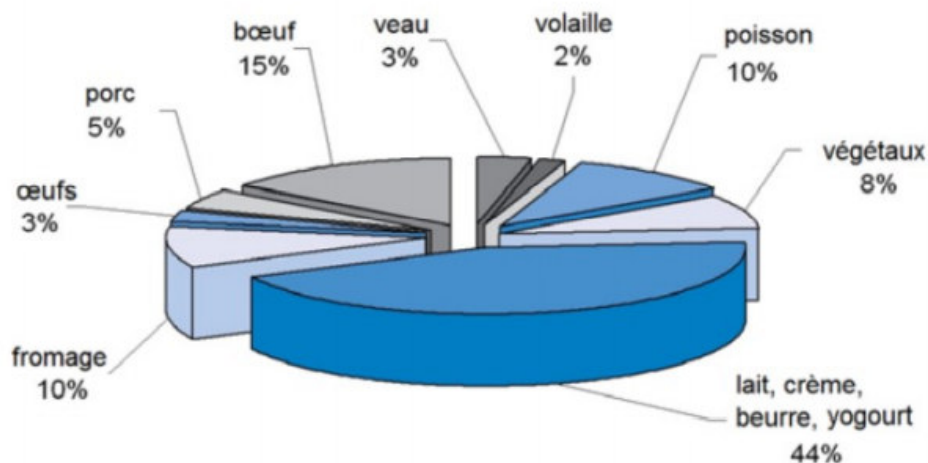


Figure 3 : Profil d'exposition via l'alimentation aux PCBs et dioxines de la population suisse pour un total d'environ 1,75 pg TEQ/kg de poids corporel/jour.

Source : OFAG, 2019

Les POPs constituent un sujet d'inquiétude majeur pour la santé humaine. Chez l'homme, ils sont associés à de nombreux effets toxicologiques, tels que la dégradation du système immunitaire, la neurotoxicité, l'altération des fonctions de reproduction et des propriétés cancérogènes (ADEME, 2017). Même à de faibles concentrations, l'exposition prolongée aux POPs peut provoquer des perturbations chroniques. En Suisse, on estime que la consommation journalière de POPs est similaire à la moyenne européenne et correspond à environ 1.75 pg en équivalent toxicologique (TEQ) par kilo de poids corporel par jour, soit une quantité supérieure à celle estimée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) assurant une consommation sans danger sur une longue période qui est de 1 pg TEQ par kilo de poids corporel par jour (OFAG, 2019). Par ailleurs, on estime que près de 18% de l'exposition des humains aux POPs est due à la consommation de viandes bovines (OFAG, 2019). Et une grande partie de l'exposition est également due à la consommation de produits laitiers (voir figure 3). En effet, les POPs sont de nature lipophile. Ils ont donc tendance à se lier aux corps gras, tels que la matière grasse (MG) du lait et des tissus adipeux. Chez l'homme adulte, la demi-vie d'élimination des dioxines accumulées est estimée à 7 ans en moyenne, contre 5.5 à 11 ans pour les PCBs selon les congénères (CITEPA, 2020). Cette demi-vie d'élimination correspond à la durée moyenne au bout de laquelle la moitié du POP considéré est éliminée. En Suisse, trois programmes de surveillance axés sur des échantillons de viande menés au cours des années 2003, 2006 et 2008 ont révélé que la viande bovine issue d'élevages extensifs de vaches allaitantes dépassait fréquemment les ML en POPs de la viande. Suite à ces observations, un autre programme de surveillance des viandes bovines issues de l'agriculture extensive a été mis en place en 2012. Sur les soixante échantillons de viande prélevés dans cinquante-trois fermes, 5.7% excédaient la ML (Zennegg, 2018).

L'exposition des bovins aux PCDD/Fs et PCBs est due à la fois aux sources dites « ponctuelles », c'est-à-dire par contact avec d'anciens matériaux présents dans les bâtiments d'élevage (peinture, joints en ciment, matériaux d'isolation, condensateurs et transformateurs, ...), mais aussi aux sources dites « environnementales diffuses » par déposition et accumulation dans les sols (émissions industrielles, décharges, émissions des vieux bâtiments des années 60/70's, ...). Les systèmes d'élevage bovins viande, dont la production est basée sur la consommation d'herbe pâturée ou conservée, présentent donc de plus grands risques d'exposition aux POPs par voie diffuse : les prairies sont sujettes aux dépôts atmosphériques, de plus grandes quantités de sol sont ingérées par les vaches, les

veaux ont une cinétique de croissance plus faible, etc ... (OFAG, 2019). Contrairement aux sources ponctuelles, les sources diffusives ne peuvent pas être éliminées à court terme et dans les pires cas de figure, la seule solution consiste à arrêter les activités d'élevage herbivore. La maîtrise et la réduction de l'exposition des troupeaux de vaches allaitantes aux POPs constitue donc un enjeu majeur pour la durabilité de ces élevages.

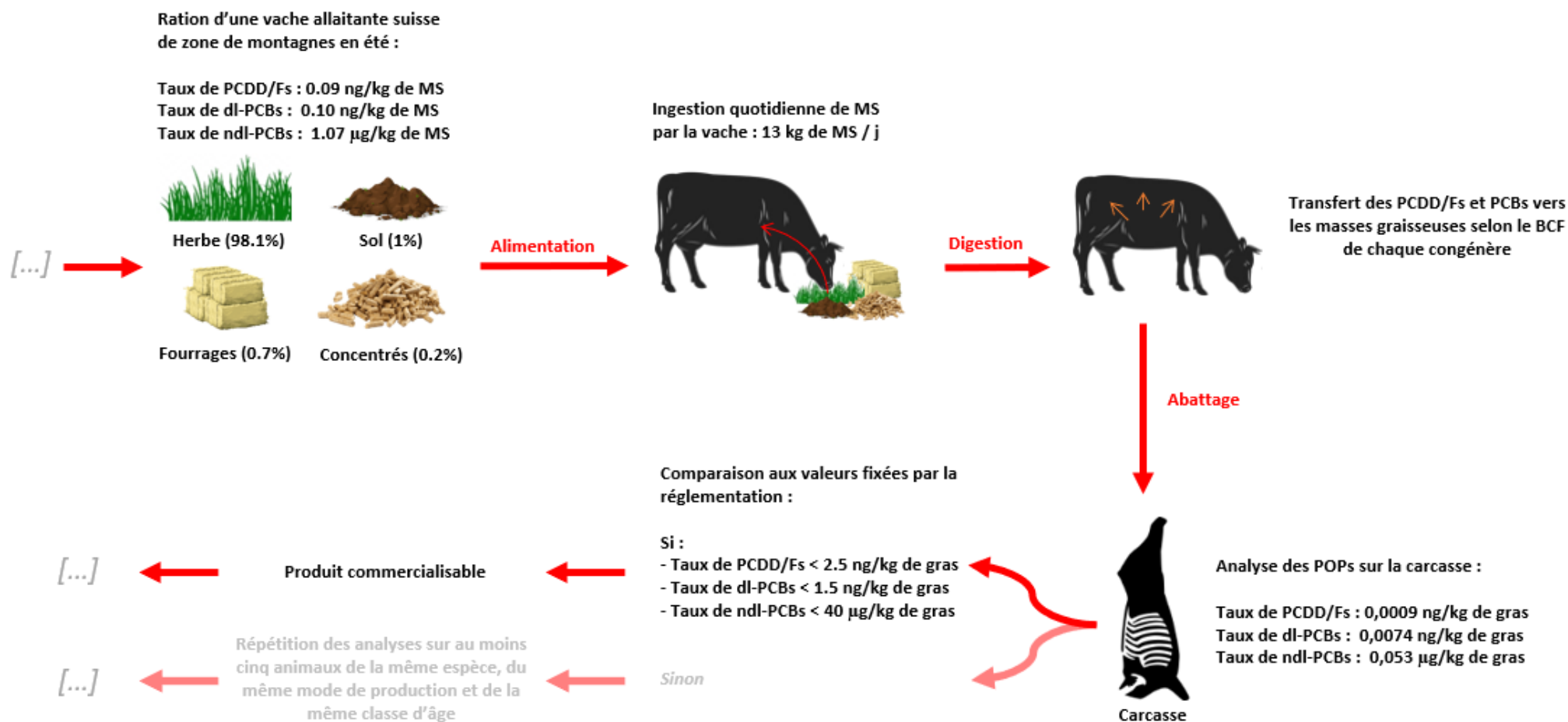


Figure 4 : Schéma des flux de POPs impliqués dans l'agrochaîne de la vache allaitante suisse en zone de montagnes en été

Source : *personnelle*

La figure 4 présente le schéma des flux de PCDD/Fs et PCBs impliqués dans l'agrochaîne de la vache allaitante. Une fois les concentrations dans la carcasse mesurées par les laboratoires d'analyse, ces valeurs sont comparées aux valeurs limites fixées par la réglementation. Si l'ensemble des concentrations se situe en-dessous de ces valeurs réglementaires, la viande est commercialisable. Autrement, des analyses doivent être réalisées sur au moins cinq animaux de la même espèce, du même mode de production et de la même classe d'âge. Si les cinq animaux analysés présentent un dépassement de la concentration maximale autorisée, des mesures sont prises par les autorités cantonales compétentes. Ces mesures sont définies selon la directive 2020/4 de l'Office fédéral de la sécurité alimentaire et des affaires vétérinaires (OSAV). Ainsi, la production des denrées alimentaires pour la commercialisation doit être suspendue le temps de l'identification et de l'élimination (lorsque cela est possible) de la cause des contaminations. (OSAV, 2020). Actuellement, il en tient de la responsabilité de l'éleveur de veiller à ce que les viandes qu'il produit soient conformes aux exigences réglementaires par le biais d'autocontrôles. Les enjeux économiques sont tels qu'il est donc nécessaire de pouvoir prévenir ces cas de contamination en limitant au maximum les sources de pollution.

Le problème des POPs sur la santé humaine constitue un important sujet de préoccupation pour les consommateurs. En Europe, ce problème a émergé dès les années 1970. En 1976 à Seveso en Italie, un des réacteurs de l'usine Icmesa produisant des pesticides et des herbicides a émis des vapeurs toxiques contenant des dioxines. Cette pollution a provoqué l'empoisonnement de plus de 2000 personnes et l'une des conséquences marquantes de cet incident était la défiguration de certaines via le phénomène de chloracné. Suite à de nombreux efforts et la définition de normes spécifiques, une baisse des émissions de ces polluants a pu être observée entre les années 1990 et 2018 (CITEPA, 2020). Toutefois, de nombreux incidents récents liés à la contamination par des sources diffuses continuent de survenir. C'est par exemple le cas à Rouen (France) en 2019. Un incendie dans l'usine Lubrizol s'est déclaré dans la nuit du mercredi 25 au jeudi 26 septembre 2019. L'usine fabriquait des lubrifiants industriels et des additifs pour carburants. Ainsi, la combustion de ces composés chimiques a provoqué l'émission de dioxines dans l'environnement et des retombées de suie (BFMTV, 2019). Ces suies polluées se sont infiltrées dans les sols et ont contaminé les aliments des animaux. En conséquence, les polluants se sont accumulés dans les organismes des animaux et certains éleveurs ont dû jeter tout ou partie de leur production. C'est par exemple le cas d'un éleveur de Villereau, une commune voisine du lieu de l'incident, qui a dû déverser dans les égouts près de 5000 litres de lait suite à un arrêté préfectoral (Franceinfo, 2019). Plus récemment en Suisse en 2021, des analyses réalisées sur quarante-neuf sites de la ville de Lausanne ont révélé une pollution aux dioxines et furanes sur dix-huit d'entre eux, dont l'accès à neuf considérés comme sensibles a dû être restreint. Cette contamination des sites serait liée à l'exploitation de l'usine du Vallon située à proximité (Le Matin Dimanche, 2021). Suite à l'occurrence encore actuelle d'épisodes de contamination en POPs, les efforts doivent être poursuivis afin de réduire les risques d'exposition aux POPs des humains.

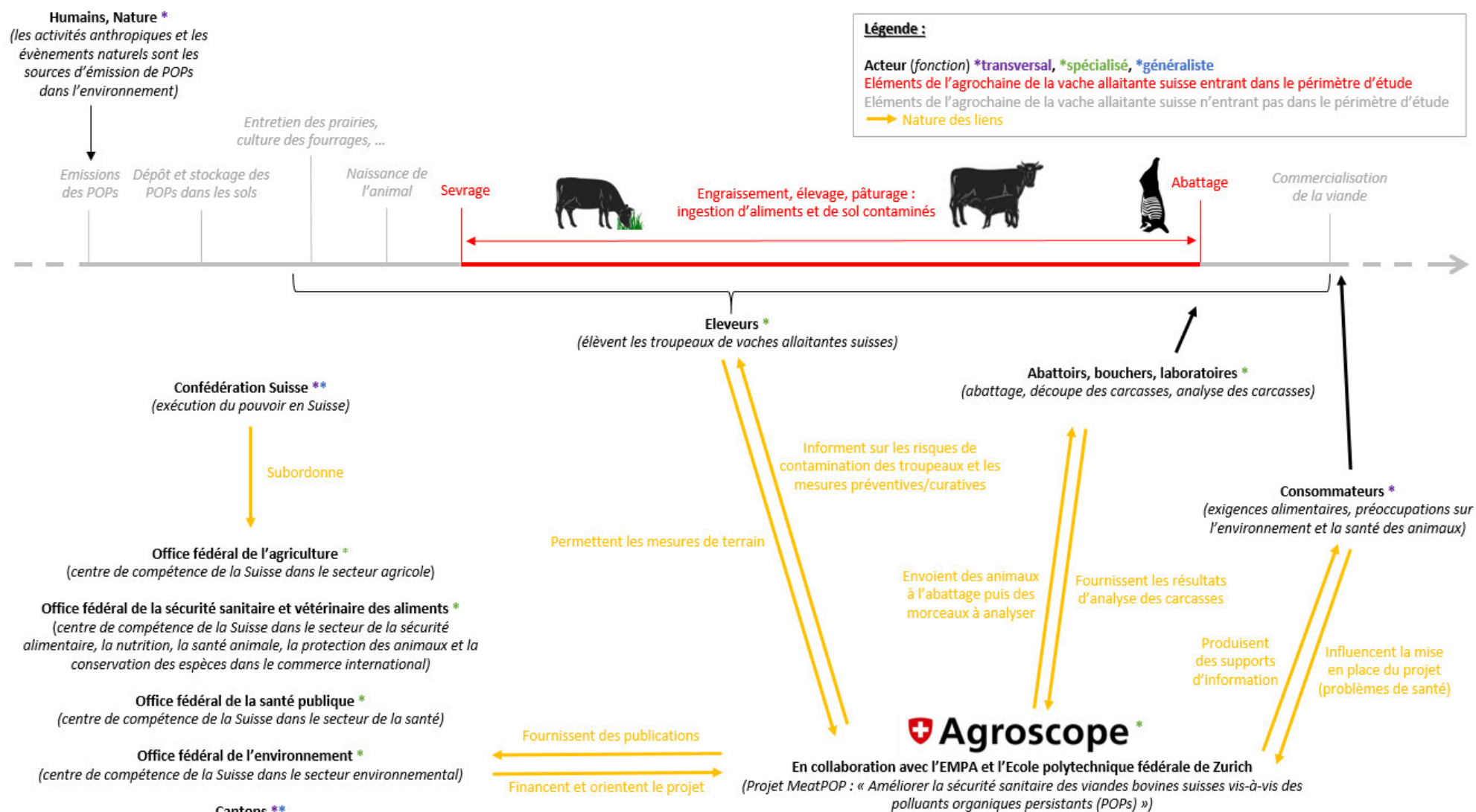


Figure 5 : Schéma des acteurs impliqués dans l'agrochaîne de la vache allaitante suisse et des relations entre ces acteurs.

Source : personnelle

2. Les objectifs et missions du projet

Le projet AgroPOP a été mis en place en 2017 par l'Agroscope, en collaboration avec l'Empa et l'école polytechnique fédérale de Zurich, et est cofinancé par l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG) ainsi que l'OSAV. Ce projet a pour objectif la conception et l'évaluation d'un modèle PBTK permettant de décrire l'absorption, la distribution, le métabolisme et l'excrétion des POPs chez les vaches allaitantes et leurs veaux, et la réalisation d'une expérimentation sur la toxicocinétique à long terme chez ces catégories d'animaux afin d'évaluer les capacités prédictives du modèle. Le développement du projet MeatPOP complète le projet AgroPOP en intégrant l'évaluation des niveaux d'exposition des bovins aux POPs issus de sources diffusives selon les systèmes d'alimentation et les pratiques d'élevage en Suisse, ainsi que la modélisation PBTK du transfert des POPs en élevage de bovins à l'engraissement. L'objectif finalisé étant de créer un modèle mécaniste qui soit générique (c'est-à-dire couvrant la plupart des POPs actuels et émergents ainsi que l'ensemble des catégories de systèmes d'élevage), au service d'une méthodologie d'évaluation et de gestion des risques sanitaires rapide et économique (pour faire face au besoin d'évaluation du risque en cas d'urgence ou de crise), et éthique (ne nécessitant que peu de données *in vivo* en lien avec les attentes sociétales en termes de réduction de l'expérimentation animale).

La figure 5 présente le schéma des acteurs impliqués dans l'agrochaîne de la vache allaitante suisse et des relations entre ces acteurs. Au sein de ce système, Agroscope se positionne comme un acteur transversal. En effet, Agroscope n'intervient pas directement sur la chaîne d'élevage de la vache allaitante Suisse. En revanche, le projet MeatPOP ne peut être réalisé sans les données des élevages de ces vaches sur les types de rations données et sur les conditions d'élevage. Par ailleurs, les résultats du projet MeatPOP permettront à l'avenir de mettre en place des actions préventives pour réduire l'exposition et la contamination des bovins aux POPs, et d'aider les producteurs et les industriels à adapter leurs pratiques pour améliorer la sécurité sanitaire de la viande. Des mesures permettront aux éleveurs d'éliminer les sources ponctuelles, qui sont facilement identifiables, et de contrôler les sources diffusives, qui ne sont pas éliminables. En complément de ces mesures, la combinaison des projets AgroPOP et MeatPOP va également permettre de déterminer des stratégies ainsi que le temps nécessaire pour décontaminer les troupeaux accidentellement exposés aux POPs en cas d'épisodes de crises sanitaires. Enfin, ces projets vont permettre de renouveler les outils actuels d'évaluation et de gestion des risques utilisés par les offices fédéraux et cantonaux compétents (OSAV, OFAG, chimiste et vétérinaire cantonaux) en y incluant les données sur les POPs actuels et émergents.

Tableau 1 : Données issues de la littérature et de sources personnelles pour la construction de la base de données.

Source : *personnelle*

Sujet étudié	Référence	Nombre de données			Données
Systèmes d'alimentation des vaches allaitantes suisses	Association Vache Mère Suisse, 2012	475			Elevages suisses de vaches allaitantes
Taux d'ingestion de sol par les vaches	Jurjanz S. et al., 2012	24			Vaches laitières
		PCDD/Fs (n=17)	dl-PCBs (n=12)	ndl-PCBs (n=6)	
	OSAV, 1997-2008, données non publiées	58	55	14	Herbe fraîche ; foin ; ensilage d'herbe ; ensilage de maïs ; concentrés ; autres
Concentrations en PCDD/Fs et PCBs d'aliments entrant dans les rations des vaches allaitantes suisses	FeedControl, 2015-2021, données non publiées	52	52	52	Concentrés ; autres
	Zennegg M. et al., 2017, données non publiées	3	2	3	Herbe fraîche ; foin
	Bogdal C. et al., 2017	0	0	4	Herbe fraîche ; ensilage d'herbe
Concentrations en PCDD/Fs et PCBs de sols ruraux	Schmid P. et al., 2005	10	0	10	PCDD/Fs, ndl-PCBs
	Bogdal C. et al., 2017	1	2	1	dl-PCBs, ndl-PCBs
	Zennegg M. et al., 2020, données non publiées	15	15	15	PCDD/Fs, dl-PCBs, ndl-PCBs
	Zennegg M. et al., 2017, données non publiées	1	1	1	PCDD/Fs, dl-PCBs, ndl-PCBs

II. Matériels et méthodes

Une base de données a été créée à partir de diverses sources afin de décrire i) les rations offertes aux vaches allaitantes selon différentes zones géographiques de Suisse, ii) les concentrations en PCDD/Fs et PCBs de différents fourrages et concentrés composant les rations offertes aux vaches, iii) les niveaux d'ingestion de sol par les vaches, ainsi que iv) les niveaux de contamination en PCDD/Fs et PCBs des sols agricoles Suisses. L'ensemble des sources et caractéristiques des données utilisées lors de la synthèse des bases de données sont résumées dans le tableau 1. Les étapes de la mise en place de cette base de données sont présentées dans la figure 6.

Seule l'exposition aux PCDD/Fs et PCBs par voie diffuse via l'ingestion d'aliments solides et de sol est considérée. Les voies d'exposition ponctuelles (contacts avec matériaux et équipements contaminés en élevage, aliments contaminés accidentellement) ne sont pas considérées, ainsi que les voies diffuses via la respiration et l'ingestion d'eau qui sont considérées comme négligeables (les POPs étant des composés peu volatils et hydrophobes), tout comme l'exposition par voie cutanée. Par ailleurs, nous ne nous intéressons qu'à dix-sept PCDD/Fs, douze dl-PCBs et six ndl-PCBs. Bien qu'il existe près de 209 congénères de PCB, 75 congénères pour les PCDD et 135 congénères pour les PCDF, les dix-sept PCDD/Fs choisis possèdent un potentiel toxique vis-à-vis d'un même récepteur. Les douze dl-PCBs choisis présentent également entre eux la même activité biologique. En ayant la même activité biologique, ces molécules sont donc plus fréquemment prises en compte dans le dosage des aliments et dans les études environnementales (Bodéan F., Nowak C., 2005). Ainsi, il s'agit des molécules faisant l'objet de limites réglementaires à ne pas dépasser dans les aliments fixées par le droit sur les denrées alimentaires.

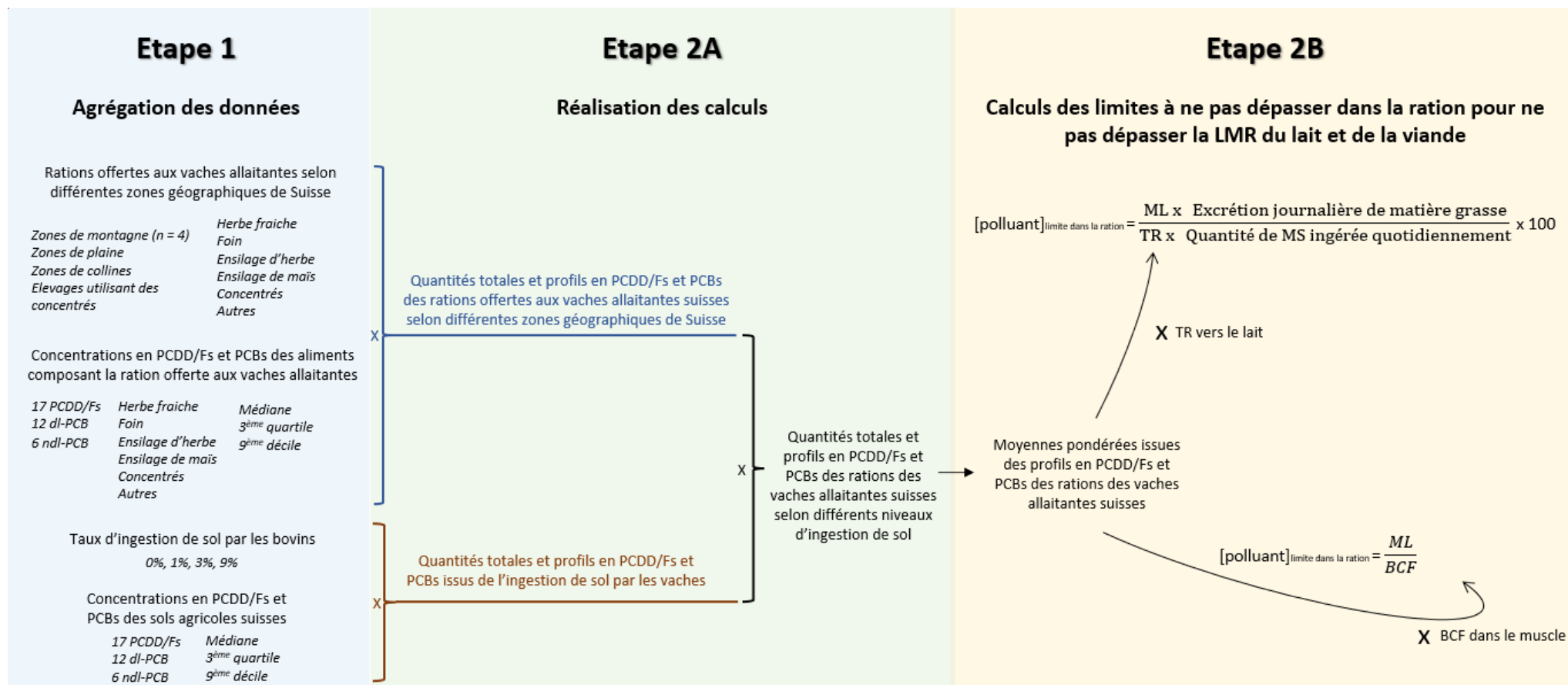


Figure 6 : Schéma détaillé des étapes de création et de calculs de la base de données

Source : *personnelle*

1. Construction de la base de données

1.1. Rations offertes aux vaches allaitantes selon différentes zones géographiques de Suisse

Les données de composition des rations de vaches allaitantes que l'on retrouve typiquement en Suisse selon différentes zones géographiques ont été fournies par l'Association Vache mère Suisse. L'étude menée par l'association en 2012 a permis d'avoir des données sur les systèmes d'alimentation de 475 élevages répartis dans toute la Suisse (Iten A., 2012). Il s'agit d'un fichier Excel présentant, pour chaque élevage d'une zone géographique définie (quatre zones de montagnes, zone de collines, zone de plaines) la composition des rations offertes aux vaches allaitantes et à leurs veaux pour les périodes hivernales et de pâturage. La composition des rations est définie selon huit catégories d'aliments que sont : l'herbe fraîche pâturée, le foin, l'ensilage d'herbe, l'ensilage de maïs, la paille, la pulpe de betterave sucrière, d'autres fourrages (pomme de terre, ...), et les aliments concentrés (matières premières céréalières ou oléo-protéagineuses ou aliments complets du commerce).

A partir de ces données, sept cas types de rations ont été élaborés : quatre rations types de zones de montagne, une ration type de zone de colline, une ration type de zone de plaines, et une ration type d'élevages utilisant des concentrés. Chaque ration est définie selon les deux périodes de l'année que sont l'hiver et l'été et établit les proportions sur la base de la matière sèche (MS) de six catégories d'aliments principales : l'herbe pâturée, le foin, l'ensilage d'herbe, l'ensilage de maïs, les autres fourrages et les concentrés. La ration type d'élevages utilisant des concentrés a été définie à partir des élevages utilisant des concentrés dans l'alimentation de leurs vaches, une majorité d'élevages n'en utilisant que très peu voire pas du tout.

Les données sur les concentrations en PCBs et PCDD/Fs des différents fourrages et concentrés entrant dans l'alimentation des vaches allaitantes ont été en majeure partie recueillies de 2015 à 2021 au sein de la base de données de l'unité contrôle des aliments pour animaux d'Agroscope (FeedControl, données non-publiées) complétées de celles compilées entre 1997 et 2008 par l'office fédéral de la sécurité sanitaire et des affaires vétérinaires (OSAV, données non publiées). Ces données ont pu être complétées de quelques données de concentrations en PCBs et PCDD/Fs d'échantillons d'herbe fraîche et de foin récoltés sur le domaine expérimental d'Agroscope Posieux en 2018 (Zennegg M., Driesen C. et Lerch S., données non publiées), et des données de concentration en POPs d'échantillons d'herbe et d'ensilage d'herbe prélevés dans les cantons de Lucerne et des Grisons en 2017 (Bogdal C. et al., 2017). Les données fournies par chacune des bases de données sont détaillées tableau 2.

Tableau 2 : Données issues de la littérature et de sources personnelles pour la synthèse de données concernant les concentrations en PCDD/Fs et PCBs des aliments pour animaux en Suisse

Source : personnelle

Sujet étudié	Référence	Catégorie d'aliment	PCDD/Fs (n=17)		dl-PCBs (n=12)		ndl-PCBs (n=6)	
			Nombre de données	< LOD	Nombre de données	< LOD	Nombre de données	< LOD
Concentrations en PCDD/Fs et PCBs des aliments	OSAV, 1997-2008, données non publiées	Herbe fraîche	32	64%	17	26%	8	8%
		Foin	3	57%	3	31%	1	0%
		Ensilage d'herbe	5	58%	5	32%	3	22%
		Ensilage de maïs	6	56%	3	39%	1	0%
		Concentrés	10	69%	27	21%	1	0%
		Autres	2	50%	-	-	-	-
	FeedControl, 2015-2021, données non publiées	Concentrés	45	90%	45	63%	45	85%
		Autres	7	90%	7	100%	7	100%
	Zennegg M. et al., 2017, données non publiées	Herbe fraîche	1	94%	-	-	1	0%
		Foin	2	65%	2	4%	2	0%
	Bogdal C. et al., 2017	Herbe fraîche	-	-	-	-	2	0%
		Ensilage d'herbe	-	-	-	-	2	0%

1.2. Concentrations en PCDD/Fs et PCBs des aliments composant la ration offerte aux vaches allaitantes

A partir de l'ensemble de ces données, un tableau présentant les valeurs de concentration en polluants pour les dix-sept PCDD/Fs, douze dl-PCB et six ndl-PCB de chaque type d'aliments a été créé. Chaque aliment analysé est réparti dans l'une des six catégories d'aliments offerts dans les rations des vaches allaitantes.

Certaines valeurs de concentration en POPs étaient inférieures à la limite de détection (LOD) de l'analyse de l'aliment. Ainsi, dans un premier temps, ces valeurs inférieures à la LOD ont été intégrées tel quel à la valeur de la LOD dans la base de données. Cette situation représente le pire des cas possible de contamination et est appelée « upper-bound ». Dans un second scénario, ces valeurs ont été divisées par deux afin de décrire une situation moins critique appelée « mid-bound ».

Par ailleurs, dans le cas des PCDD/F et des dl-PCB, les valeurs de concentrations en polluants des différents aliments ont été converties en équivalent toxicologique (TEQ). En effet, la toxicité de chaque congénère est définie par un facteur d'équivalent toxique (TEF). Le calcul en TEQ consiste donc à multiplier la concentration brute de chaque congénère par son TEF. Suite à l'avancée des connaissances, ce TEF est réévalué régulièrement. La mise à jour utilisée dans nos calculs est celle proposée par l'OMS en 2005.

1.3. Taux d'ingestion de sol par les bovins

Pour évaluer l'ingestion de sol au pâturage, les méthodes utilisées par les auteurs dans la littérature consistent généralement à utiliser un marqueur indigestible présent en grandes concentrations dans les sols mais peu concentré dans les plantes. Ensuite, la quantité de sol ingérée est estimée grâce à un bilan massique basé sur les concentrations en marqueur dans les sols, dans les végétaux et dans les fécès, ainsi que sur la digestibilité de la MS de la ration, cette dernière étant estimée, ou bien mesurée grâce au dopage oral avec un marqueur indigestible externe (e.g. alcanes pairs, ytterbium, chrome...). Mais l'ingestion de sol étant dépendante du type d'animal, des conditions pédoclimatiques, et des pratiques d'élevage, il est difficile de prédire de manière fiable et à partir d'un niveau unique la quantité de sol ingéré par les herbivores au pâturage (Chatelet et al., 2015). Les taux d'ingestion de sol par les bovins à la pâture ont été estimés grâce aux travaux de Jurjanz et al. (2012) et la gamme de 1% à 9% de sol dans la MS ingérée totale a ainsi été retenue.

Tableau 3 : Données issues de la littérature et de sources personnelles pour la base de données sur les concentrations en PCDD/Fs et PCBs des sols agricoles suisses.

Source : personnelle

Sujet étudié	Référence	PCDD/Fs (n=17)		dl-PCBs (n=12)		ndl-PCBs (n=6)	
		Nombre de données	< LOD	Nombre de données	< LOD	Nombre de données	< LOD
Concentrations en PCDD/Fs et PCBs de sols ruraux	Schmid P. et al., 2005	10	9%	-	-	10	0%
	Bogdal C. et al., 2017	1	0%	2	0%	1	0%
	Zennegg M. et al., 2020, données non publiées	15	4%	15	5%	15	0%
	Zennegg M. et al., 2017, données non publiées	1	35%	1	8%	1	0%

1.4. Concentrations en PCDD/Fs et PCBs des sols agricoles suisses

Les données sur les taux de contamination en PCBs et PCDD/Fs des sols agricoles suisses ont pu être obtenues grâce à la compilation de quatre bases de données. Les données de l'Observatoire national des sols (NABO), animé par Agroscope, correspondent aux concentrations en polluants de dix échantillons de terres agricoles prélevés en 1999 dans différentes zones géographiques de Suisse (prairies extensives/intensives, terres arables, Schmid P. et al., 2005). Ces données ont été complétées par des données de concentrations en POPs de sols de prairies relevées dans les cantons de Lucerne et des Grisons (Bogdal C. et al., 2017), de sols de jardins potagers relevées en 2020 dans les zones rurales du canton de Schaffhouse (Zennegg M. et al., 2020, données non publiées), et de sols du site expérimental d'Agroscope Posieux relevées en 2017 (Zennegg M., Driesen C. et Lerch S., données non publiées). Les données fournies par chacune des bases de données sont détaillées tableau 3.

A partir de l'ensemble de ces données, un tableau présentant les valeurs de concentration en polluants pour les dix-sept PCDD/Fs, douze dl-PCB et six ndl-PCB des sols agricoles suisses a été créé. Ensuite, au même titre que pour la base de données sur les taux de contamination des aliments, les valeurs de concentrations des PCDD/Fs et dl-PCBs ont été converties en équivalent toxicologique (TEQ).

2. Calculs à partir de la base de données

2.1. Considération de trois différents scénarios de contamination

A partir des distributions des concentration obtenues pour chacun des congénères des PCDD/Fs et des PCBs dans chacune des six catégories d'aliments et le sol, les valeurs médiane, troisième quartile (Q3) et neuvième décile (D9) ont été déterminées. Par la suite, trois scénarios de contamination des rations sont envisagés : le cas médian, Q3 et D9. L'intérêt de disposer de ces trois types de situations est de pouvoir par la suite simuler différents cas de contamination de l'environnement d'élevage. Sans cas particulier de contamination des aliments et du sol avérée dans un élevage, on considèrera le cas médian. En cas de contamination avérée mais non élevée, on considèrera le cas Q3. Et en cas de contamination élevée, on considèrera alors le cas D9.

2.2. Limite de concentrations en PCDD/Fs et PCBs à ne pas dépasser dans la ration des vaches allaitantes suisses

En plus de la limite maximale réglementaire et du seuil d'action légal définis réglementairement pour l'alimentation animale, un calcul théorique de concentration en PCDD/Fs et PCBs à ne pas dépasser dans la ration des vaches allaitantes, afin de ne pas dépasser la limite maximale réglementaire dans le lait et la viande a été élaboré grâce au taux de transfert vers le lait (TR_{lait}) et au facteur de bioconcentration dans le tissu adipeux (BCF), respectivement.

2.2.1. Cas du lait

Le TR correspond au ratio entre la quantité de polluants excrétée dans le lait (ou l'œuf chez la volaille de ponte) et la quantité de polluants ingérée et s'exprime en pourcents :

$$TR_{\text{lait}} = \frac{[\text{polluant}]_{\text{matière grasse du lait}} (\text{pg/g de matière grasse}) \times \text{Excrétion journalière de matière grasse (g/j)}}{[\text{polluant}]_{\text{ration}} (\text{pg/g de MS}) \times \text{Quantité de MS ingérée quotidiennement (g/j)}} \times 100$$

7Le terme [polluant]_{matière grasse du lait} correspond à la concentration en polluant dans la MG du lait (en pg/g de matière grasse), et le terme [polluant]_{ration} correspond à la concentration en polluant dans la MS de la ration ingérée quotidiennement (en pg/g de MS).

Tableau 4 : Limites maximales réglementaires (ML) et niveaux d'action (AL) pour les différentes catégories d'aliments pour l'alimentation animale ou humaine selon la réglementation suisse et de l'union européenne.

Source : Zennegg M. et al., 2018

Food category	ML WHO-TEQ PCDD/F	ML WHO-TEQ PCDD/F + dl- PCB	AL WHO-TEQ PCDD/F	AL WHO-TEQ dl-PCB	ML ndl-PCB (Sum PCB 28, 52, 101, 138, 153, 180)
	pg/g fat	pg/g fat	pg/g fat	pg/g fat	ng/g fat
Bovine animals and sheep	2.5	4.0	1.75	1.75	40
Poultry	1.75	3.0	1.25	0.75	40
Pigs	1.0	1.25	0.75	0.50	40
Raw milk and dairy products	2.5	5.5	1.75	2.0	40
	pg/g wet weight	pg/g wet weight	pg/g wet weight	pg/g wet weight	ng/g wet weight
Liver of bovine animals, poultry and pigs	0.30	0.50	–	–	3.0
Liver of sheep	1.25	2.0	–	–	3.0
Products intended for animal feed	ML WHO-TEQ PCDD/F	ML WHO-TEQ PCDD/F + dl- PCB	AL WHO-TEQ PCDD/F	AL WHO-TEQ dl-PCB	ML ndl-PCB (Sum PCB 28, 52, 101, 138, 153, 180)
	ng/kg	ng/kg	ng/kg	ng/kg	µg/kg
Feed of plant origin	0.75	1.25	0.50	0.35	10
Animal fat including milk	1.50	2.0	0.75	0.75	10

ML = Maximum Levels; AL = Action Levels; ML and AL according to: Kontaminantenverordnung (VHK) Stand 1. Mai 2017 Anhang 5; Commission Regulation (EU) No 1259/2011; Commission Regulation (EU) No 277/2012; Commission Regulation (EU) No 1067/2013; Commission Recommendation (EU) 2013/711 EU.

Tableau 5 : Taux de transfert moyens vers le lait et les œufs des PCDD/Fs

Source : Amutova F. et al., 2021

Compound	TEF (WHO ₀₅)	Chemical characteristics			Transfer to milk		Transfer to hen eggs		Transfer to duck eggs
		Cl _n	Log K _{ow} ^a	MW	TR ^b , %(n = 8)	Level ^c	TR, %(n = 4)	Level	TR ^d , %(n = 1)
2,3,7,8-TCDD	1	4	6.6	322	34.0 ± 6.3	High	39.1 ± 12.6	High	2.0
1,2,3,7,8-PeCDD	1	5	7.2	340	26.7 ± 7.1	High	35.8 ± 12.2	High	3.4
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1	6	7.6	391	17.8 ± 8.0	Medium	43.3 ± 16.5	High	2.3
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1	6	7.6	391	22.7 ± 7.1	Medium	40.6 ± 14.4	High	3.0
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1	6	7.6	391	13.2 ± 3.4	Medium	29.1 ± 12.4	High	1.3
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.01	7	8.0	425	4.1 ± 1.3	Low	16.2 ± 6.2	Medium	1.1
OCDD	0.0003	8	8.4	460	1.2 ± 0.8	Low	6.8 ± 4.8	Low	1.0
2,3,7,8-TCDF	0.1	4	6.5	306	3.4 ± 2.9	Low	39.1 ± 16.8	High	6.4
1,2,3,7,8-PeCDF	0.03	5	7.0	340	4.9 ± 4.5	Low	38.0 ± 7.4	High	4.5
2,3,4,7,8-PeCDF	0.3	5	7.1	340	35.6 ± 14.8	High	40.0 ± 10.1	High	4.8
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.1	6	7.5	375	19.3 ± 8.9	Medium	39.8 ± 13.0	High	2.5
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1	6	7.6	375	17.7 ± 6.0	Medium	37.3 ± 16.1	High	2.4
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1	6	7.7	375	10.7 ± 7.0	Medium	25.6 ± 13.0	High	1.9
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.1	6	7.6	375	11.6 ± 8.7	Medium	23.0 ± 16.5	Medium	0.8
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.01	7	8.0	409	3.1 ± 1.1	Low	16.6 ± 10.7	Medium	0.7
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.01	7	8.2	409	4.6 ± 1.3	Low	17.8 ± 8.7	Medium	1.1
OCDF	0.0003	8	8.6	443	1.0 ± 1.3	Low	4.0 ± 2.5	Low	0.1

Bold values are highly transferred.

^a log K_{ow} for PCDDs and PCDFs were taken from Chen et al. (2001) and Govers and Krop, 1998 respectively.^b Means and SD of TRs to milk were calculated using the data reported in studies McLachlan and Richter 1998; Malisch, 2000; Fries et al., (1999); Fries et al. (2002); Costera et al., (2006); Lorenzi et al., (2020); Diletti et al., (2014); Schuler et al. (1997).^c Means and SD of TRs to eggs were calculated using the data of the 2 treatments reported by Hoogenboom et al., (2006); Petreas et al., 1991; Pirard and De Pauw (2005); Pirard and De Pauw (2006).^d Transfer to duck eggs based on Shih et al. (2009), level of transfer is low for all congeners.

Afin de connaître le taux de contamination seuil à ne pas dépasser dans la ration pour que le taux de contamination du lait ne dépasse pas la limite maximale réglementaire, l'équation suivante est utilisée :

$$[\text{polluant}]_{\text{limite dans la ration}} = \frac{ML \times \text{Excrétion journalière de matière grasse}}{TR_{\text{pondéré}} \times \text{Quantité de MS ingérée quotidiennement}} \times 100$$

Dans cette équation, les valeurs concernant la physiologie de la vache allaitante suivantes ont été retenues : production de 7 kg de lait par jour en moyenne avec un taux butyreux moyen de 37 g/kg de MG (Sepchat B. et al., 2017). On estime également que la quantité de MS ingérée est en moyenne de 13 kg par jour (OMAFRA, 2021). La concentration en polluant dans la matière grasse du lait est fixée au niveau de la ML à ne pas dépasser dans le lait selon la catégorie de polluants (PCDD/Fs, dl-PCBs ou ndl-PCBs ; voir tableau 4). Le TR pondéré pour chaque profil de ration et chaque catégorie de polluant a été obtenu grâce au calcul suivant :

$$TR_{\text{pondéré}} = \sum_{i=1}^n TR_i \times \text{proportion}_i$$

Dans cette équation, le terme TR_i correspond au taux de transfert vers le lait du congénère i. Et le terme « proportion_i » correspond à la proportion du congénère i dans la somme des congénères de la catégorie correspondante (PCDD/Fs, dl-PCBs ou ndl-PCBs) dans la ration étudiée. La variable i varie de 1 à n, avec n=17 dans le cas des PCDD/Fs, n=12 dans le cas des dl-PCBs, et n=6 dans le cas des ndl-PCBs. Les valeurs de TR vers le lait utilisées pour calculer le TR pondéré pour chaque congénère sont issues de la synthèse d'Amutova et al. (2021) et sont présentées dans les Tableaux 5 et 6.

2.2.2. Cas de la viande

Le BCF correspond au ratio entre la concentration de polluant dans le tissu d'intérêt et celle dans la ration ingérée :

$$BCF = \frac{[polluant]_{tissu} (pg/g \text{ de matière grasse})}{[polluant]_{ration} (pg/g \text{ de ration sèche})}$$

Dans cette équation, le terme $[polluant]_{tissu}$ correspond à la concentration en polluant dans le tissu (en pg/g de matière grasse) et le terme $[polluant]_{ration}$ correspond à la concentration en polluant dans la ration ingérée (en pg/g MS). Les valeurs de de BCF nous permettent de déterminer la concentration à ne pas dépasser dans la ration des vaches allaitantes suisses pour que la viande puisse rester commercialisable (Amutova F. et al., 2021). Afin de connaître ce taux de contamination seuil à ne pas dépasser dans la ration pour que le taux de contamination de la viande ne dépasse pas la limite maximale réglementaire, l'équation suivante est utilisée :

$$[polluant]_{\text{limite dans la ration}} = \frac{[polluant]_{tissu}}{BCF_{\text{pondéré}}}$$

Le $BCF_{\text{pondéré}}$ est obtenu de la même manière que pour $TR_{\text{pondéré}}$. Par manque de données disponibles dans la littérature décrivant le transfert des PCDD/Fs chez le bovin viande, seul le cas des BCF vers le tissu adipeux pour les PCBs a été retenu. Les BCF associés sont présentés Tableau 7.

Tableau 6 : Taux de transfert moyens vers le lait et les œufs des PCBs

Source : Amutova F. et al., 2021

PCB No	TEF (WHO ₀₅)	Chemical characteristics				Transfer to milk			Transfer to hen eggs		
		Cl _n	Log K _{ow} ^a	MW	Substitution type	TR ^b , %	level	n	TR ^c , %	level	n
28	Nd	3	5.6	257	mono-ortho	9.4 ± 12.8	medium	7	40.5 ± 3.5	high	2
52	Nd	3	5.8	292	di-ortho	3.8 ± 5.4	low	6	4.5 ± 0.7	low	2
77	0.0001	4	6.4	292	non-ortho	5.5 ± 4.3	low	7	32.6 ± 25.9	high	3
81	0.0003	4	6.4	292	non-ortho	12.5 ± 6.0	medium	6	30.2 ± 17.8	high	3
101	nd	5	6.3	326	di-ortho	4.8 ± 1.3	low	6	5.0	low	2
105	0.00003	5	6.6	326	mono-ortho	50.0 ± 33.4	high	4	49.0 ± 4.2	high	2
114	0.00003	5	6.6	326	mono-ortho	51.8 ± 16.2	high	6	51.5 ± 0.7	high	2
118	0.00003	5	6.7	326	mono-ortho	77.8 ± 45.1	high	5	50.0 ± 2.8	high	2
123	0.00003	5	6.7	326	mono-ortho	22.2 ± 10.6	medium	6	74.0 ± 5.7	high	2
126	0.1	5	7.0	326	non-ortho	40.2 ± 11.4	high	5	37.7 ± 19.6	high	3
138	nd	6	6.7	361	di-ortho	46.1 ± 19.0	high	6	52.5 ± 2.1	high	2
153	nd	6	6.8	361	di-ortho	54.1 ± 25.1	high	4	59.0 ± 2.8	high	2
156	0.00003	6	7.1	361	mono-ortho	64.1 ± 26.3	high	3	56.5 ± 2.1	high	2
157	0.00003	6	7.1	361	mono-ortho	50.5 ± 21.5	high	3	58.0 ± 9.9	high	2
167	0.00003	6	7.2	361	mono-ortho	58.1 ± 25.3	high	3	80.0 ± 5.7	high	2
169	0.03	6	7.5	361	non-ortho	40.3 ± 8.0	high	4	39.5 ± 19.9	high	3
180	nd	7	7.2	395	di-ortho	51.8 ± 17.7	high	3	50.0 ± 12.7	high	2
189	0.00003	7	7.6	395	mono-ortho	38.0 ± 23.2	high	3	61.0	high	2

Bold values are highly transferred nd: not determined.

^a Log K_{ow} taken from Zhou et al., (2005).

^b Means and SD of TRs to milk were calculated using the data reported in studies Costera et al., 2006; Thomas et al., 1999; Ounnas et al. (2010); Lorenzi et al. (2020); Kerst et al. (2004); Diletti et al., 2014; Hoogenboom et al., 2015 (a).

^c Means and SD of TRs to eggs were calculated using the data of the 2 treatments reported by Hoogenboom et al., (2006); and Pirard and De Pauw (2005).

Tableau 7 : Facteurs de bioconcentration vers le tissu adipeux des PCBs selon la ration, la proportion de lipides dans la carcasse et le taux de croissance

Source : Driesen C. et al., 2021

BCF	Total mixed ration			Carcass lipid proportion				Growth rate			
	Low ¹	Medium ¹	High ¹	LL ¹	ML ¹	HL ¹	P-value	SG ¹	MG ¹	FG ¹	P-value
iPCB											
28	1.7	1.7	2.0	3.1 ± 1.2	1.6 ± 0.9	0.5 ± 0.1	0.14	1.3 ± 0.7	2.3 ± 1.2	1.9 ± 1.4	0.85
52	0.4	0.6	0.6	0.7 ± 0.3	0.4 ± 0.2	0.4 ± 0.1	0.59	0.3 ± 0.1	0.6 ± 0.2	0.5 ± 0.3	0.47
101	0.8	1.0	1.2	1.7 ± 0.8	0.9 ± 0.5	0.3 ± 0.03	0.24	0.7 ± 0.4	1.2 ± 0.6	1.2 ± 0.9	0.70
138	6.3	9.5	8.7	9.7 ± 2.7	8.4 ± 1.4	5.4 ± 0.9	0.24	6.3 ± 1.0	8.6 ± 1.8	9.4 ± 2.8	0.53
153	6.8	9.1	8.8	9.8 ± 2.4	8.3 ± 1.2	5.6 ± 0.7	0.18	6.7 ± 0.9	8.4 ± 1.5	9.3 ± 2.6	0.64
180	10.6	16.1	16.5	18.4 ± 6.9	15.0 ± 4.1	7.6 ± 0.7	0.22	10.9 ± 2.4	15.0 ± 6.1	17.0 ± 7.1	0.78
diPCB											
77	3.0	4.0	5.7	7.8 ± 4.2	3.4 ± 2.5	0.7 ± 0.2	0.23	2.6 ± 1.8	4.7 ± 3.1	5.5 ± 4.6	0.87
81 ²	3.5	3.9	5.0	7.2 ± 3.3	3.4 ± 2.1	1.1 ± 0.2	0.21	3.1 ± 2.0	4.6 ± 2.6	4.9 ± 3.6	0.87
105	2.2	2.0	2.9	3.4 ^a ± 0.9	2.1 ^{a,b} ± 0.2	1.4 ^b ± 0.3	0.03	2.0 ± 0.4	2.1 ± 0.5	3.0 ± 1.0	0.61
114	2.7	3.3	3.7	4.0 ± 0.9	3.3 ± 0.3	2.1 ± 0.4	0.10	2.8 ± 0.6	3.0 ± 0.3	3.9 ± 0.9	0.51
118	3.3	3.4	3.7	4.3 ± 0.6	3.4 ± 0.3	2.5 ± 0.4	0.05	3.1 ± 0.5	3.4 ± 0.4	3.9 ± 0.7	0.60
123	3.6	3.1	4.7	5.1 ^a ± 1.0	3.6 ^{a,b} ± 0.2	2.6 ^b ± 0.4	0.04	3.6 ± 0.6	3.1 ± 0.4	4.7 ± 1.1	0.42
126	8.1	8.7	8.4	9.4 ^a ± 0.6	8.8 ^a ± 0.7	6.4 ^b ± 0.5	0.01	7.5 ± 0.9	8.4 ± 0.9	9.2 ± 0.9	0.43
156	6.7	7.6	7.6	9.6 ± 2.0	6.9 ± 0.9	4.5 ± 0.9	0.08	6.3 ± 1.6	7.7 ± 0.9	7.8 ± 2.4	0.71
157	6.5	9.1	8.8	9.7 ± 2.3	8.3 ± 0.9	5.4 ± 1.4	0.16	6.5 ± 1.4	8.4 ± 0.7	9.3 ± 2.5	0.49
167	6.1	7.2	8.0	9.1 ± 2.2	6.9 ± 0.7	4.6 ± 0.8	0.11	5.9 ± 1.3	7.2 ± 0.9	8.1 ± 2.4	0.61
169 ²	9.6	13.3	12.4	10.8 ± 0.5	13.0 ± 1.9	10.8 ± 3.5	0.60	9.3 ± 1.3	11.0 ± 0.9	14.3 ± 2.2	0.16
189	9.4	12.4	16.0	17.3 ± 6.7	13.1 ± 3.1	5.7 ± 0.8	0.15	9.9 ± 3.2	12.5 ± 4.8	15.5 ± 6.9	0.76

^{a,b} Values in the same row with different superscripts differ ($P < 0.05$).

¹ Observations per category: low $n = 4$, medium $n = 3$ and high $n = 4$ energy feed level, low LL $n = 4$, medium ML $n = 4$, high HL $n = 3$ carcass lipid proportion, slow SG $n = 4$, medium MG $n = 3$, fast $n = 4$ growth rate.

² The gray values had concentrations close to the analytical blank (< 2.5 -fold higher in concentration).

Data represented are the least square means ± standard error of the non-transformed data and P -values of the log-transformed overall mixed model.

Abbreviations: iPCB: indicator polychlorinated biphenyl, diPCB: dioxin-like polychlorinated biphenyl

III. Résultats & Discussions

Jusqu'à présent, peu d'études portent sur la quantification de l'exposition aux PCDD/Fs et aux PCBs des troupeaux de vaches allaitantes suisses. Il est par ailleurs difficile de comparer les résultats obtenus avec ceux obtenus dans des études sur des vaches laitières car la physiologie et la dynamique des POPs dans l'organisme n'est pas la même.

1. Sélection et traitement des données

1.1. Rations offertes aux vaches allaitantes selon différentes zones géographiques de Suisse

Le graphique présentant les proportions des six catégories d'aliments composant les sept rations types des vaches allaitantes suisses selon trois différents niveaux d'ingestion de sol est présenté en Annexe 1. Afin de simplifier l'analyse, seules les rations d'une des quatre zones de montagne (notée « Bergzone IV ») et les rations des élevages utilisant des concentrés (notée « Concentrés ») seront présentées par la suite. Il s'agit des deux types de rations extrêmes, la ration « Bergzone IV » étant la plus riche en fourrages à base d'herbe, et la ration « Concentrés » étant la plus riche en ensilage de maïs et concentrés (figure 7). La gamme de niveaux d'ingestion de sol par les bovins a été définie de 0 à 9% de la MS ingérée grâce aux travaux de Jurjanz et al. (2012). Ces niveaux d'ingestion varient selon la quantité d'herbe offerte et le type de pâture. Les ingestions de sol à la pâture pour la vache laitière seraient, en conditions favorables (quantité d'herbe offerte élevée, peu importe le type de pâture), de 1 à 2% de la MS ingérée. En conditions défavorables (faible quantité d'herbe offerte), les taux d'ingestion de sol varieraient entre 1 et 10% de la MS ingérée selon le type de pâture (Jurjanz S. et al., 2012).

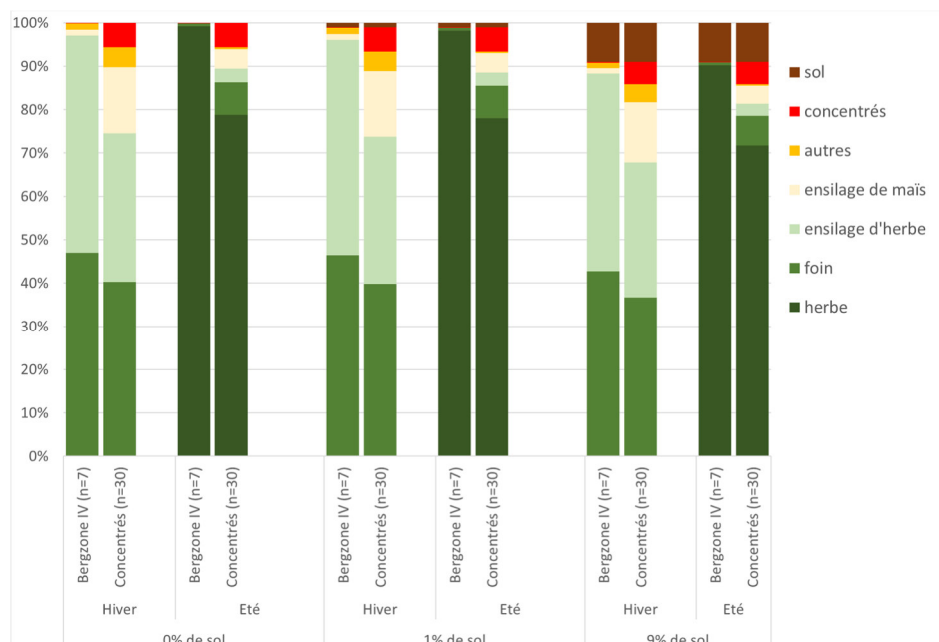


Figure 7 : Proportions des six catégories d'aliments dans les rations types de vaches allaitantes de la zone « Montagne IV » et des élevages utilisant des Concentrés, sans ou avec 1% ou 9% de sol dans la MS ingérée

Source : *personnelle d'après Iten A., 2012*

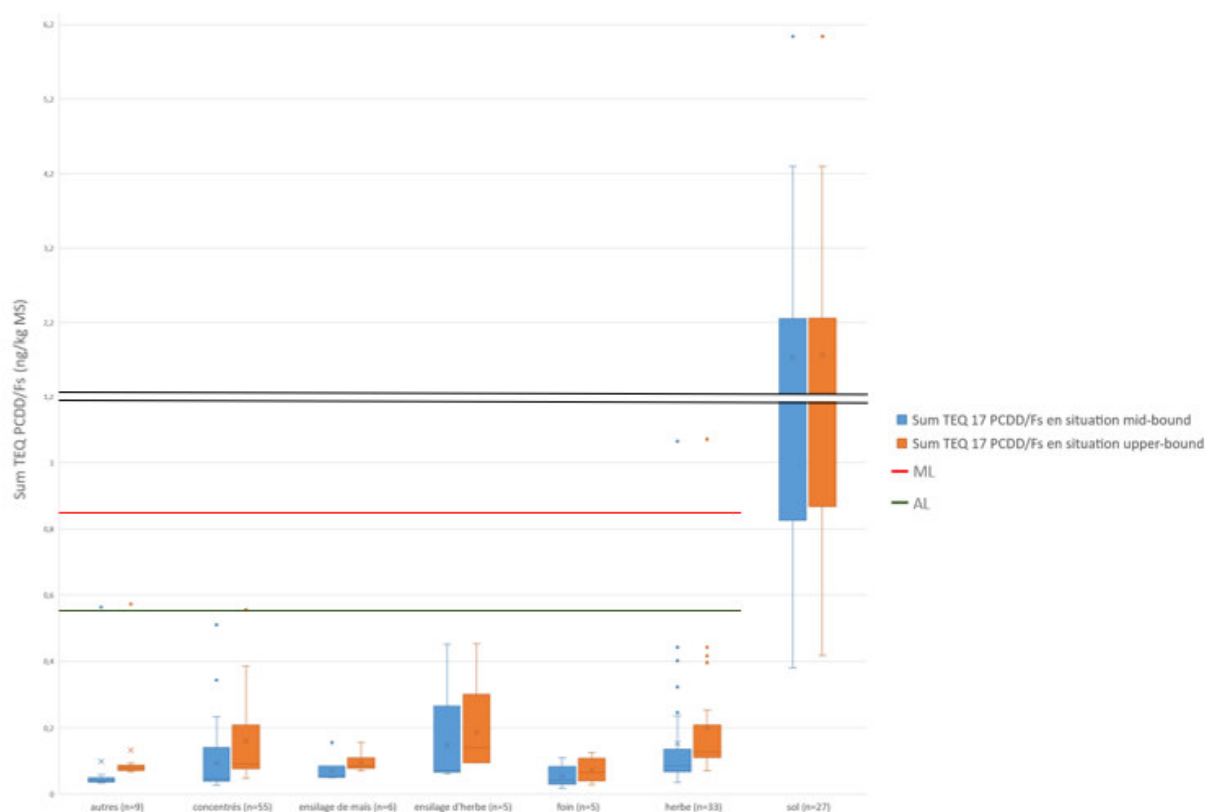


Figure 8 : Distribution des concentrations pour la somme des PCDD/Fs des six catégories d'aliments composant les rations des vaches allaitantes et des sols agricoles de Suisse

Source : *personnelle*

Ainsi, les taux d'ingestion de sol utilisés sont de 0%, 1% et 9% de la MS ingérée afin de considérer la situation favorable de référence et les cas extrêmes. Par extension, ces mêmes taux d'incorporation de sol sont considérés dans le cas des rations à base d'herbe conservée en hiver car on considère que du sol peut être accidentellement incorporé au fourrage au moment de la récolte dans de mauvaises conditions.

1.2. Concentrations en PCDD/Fs et PCBs des aliments composant les rations offertes aux vaches allaitantes et des sols agricoles de Suisse

Les profils en dix-sept congénères de PCDD/Fs, douze dl-PCBs et six ndl-PCBs dans les six catégories d'aliments composant les rations des vaches allaitantes sont présentés en Annexe 2. Les composés les plus toxiques (c'est-à-dire TCDD et 1,2,3,7,8-PeCDD, possédant un TEF égal à 1) présentent les plus fortes concentrations en équivalent TEQ dans les aliments avec à eux deux plus ou moins 40% des PCDD/Fs dans l'aliment. Le congénère 2,3,4,7,8-PeCDF, troisième composé le plus toxique parmi les dix-sept PCDD/Fs (TEF de 0.1), est également présent en grandes proportions avec, dans le cas médian de contamination, environ 20% des PCDD/Fs en équivalent TEQ dans l'aliment. En ce qui concerne les dl-PCBs, les deux composés les plus toxiques (c'est-à-dire le PCB 126 et le PCB 169 avec un TEF de 0.1) présentent les plus fortes concentrations en équivalent TEQ, avec à eux deux dans le cas médian de contamination presque 100% des dl-PCBs dans la catégorie d'aliment « autres » et près de 80% dans l'herbe.

Dans le cas des aliments, 73% des données des PCDD/Fs, 45% des dl-PCBs et 64% des ndl-PCBs sont des valeurs inférieures à la LOD. Pour les trois catégories de polluants, les médianes de l'herbe fraîche et des fourrages sont les plus élevées contrairement à celles des catégories « concentrés » et « autres » qui sont les plus faibles (figure 8, 9, 10). En effet, l'herbe et les fourrages sont récoltés plus près du sol. Ils présentent donc de plus grands risques d'être contaminés par du sol et sont donc plus exposés aux PCDD/Fs et PCBs. Certains points considérés comme extrêmes dépassent l'AL et la ML. Par exemple dans le cas des PCDD/Fs, un échantillon d'herbe a une concentration plus élevée que la ML d'environ +0,25 ng/kg de MS. Dans le cas des dl-PCBs, un échantillon de concentré a une concentration plus élevée que la ML d'environ +0,3 ng/kg de MS.

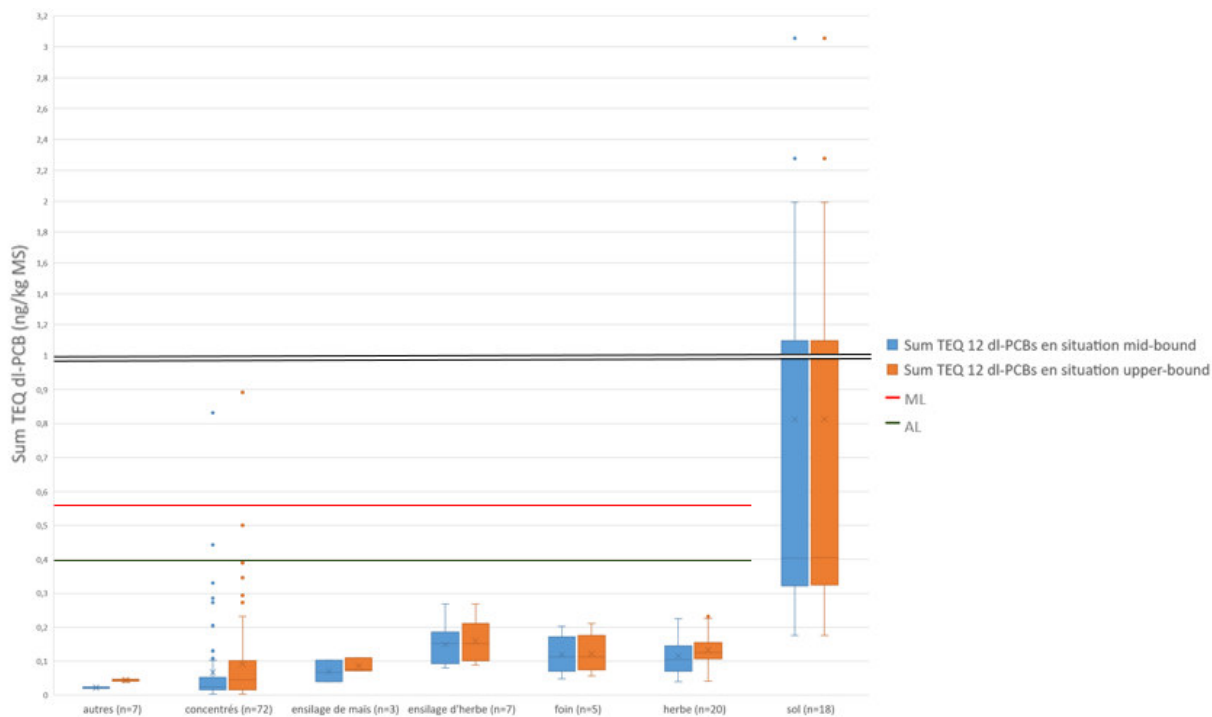


Figure 9 : Distribution des concentrations pour la somme des dl-PCBs des six catégories d'aliments composant les rations des vaches allaitantes et des sols agricoles de Suisse

Source : personnelle

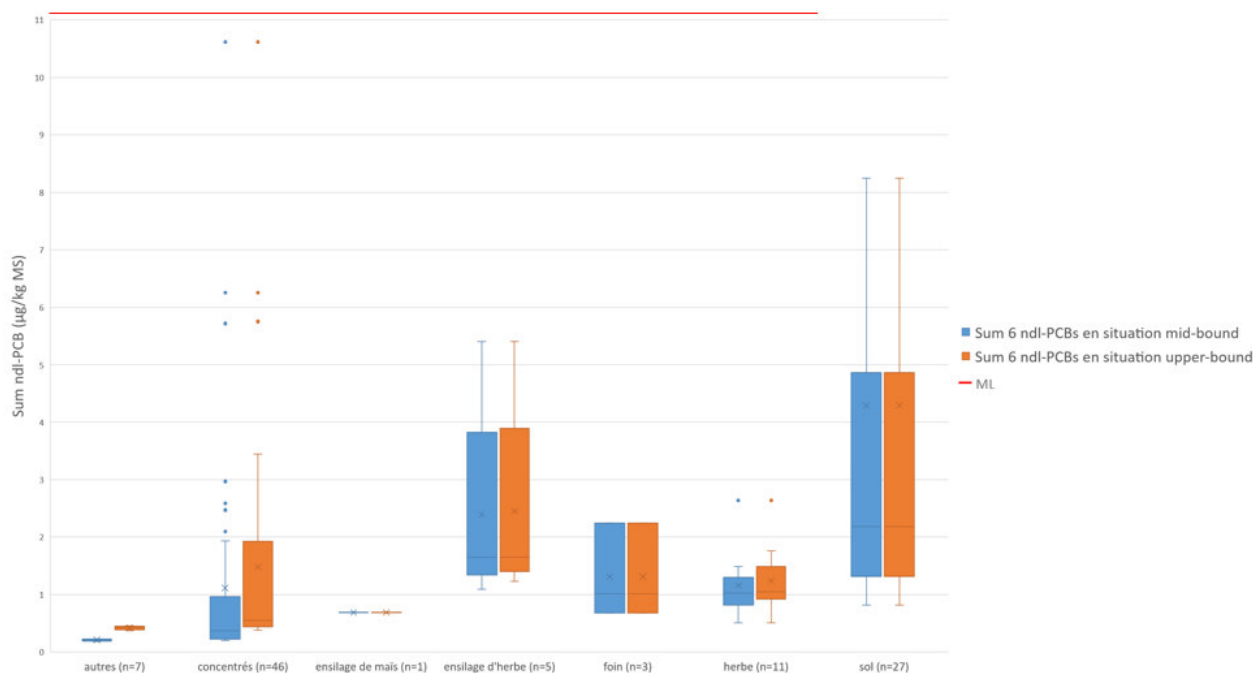


Figure 10 : Distribution des concentrations pour la somme des ndl-PCBs des six catégories d'aliments composant les rations des vaches allaitantes et des sols agricoles de Suisse

Source : personnelle

Dans le cas des sols agricoles de Suisse, seuls 7% des données des PCDD/Fs, 5% des données des dl-PCBs et 0% des données des ndl-PCBs sont des valeurs inférieures à la LOD donc les situations mid-bound et upper-bound sont similaires (figures 8-10). Les concentrations en PCDD/Fs et PCBs des sols agricoles sont plus élevées que pour les aliments donc le sol constitue ainsi une source majeure d'exposition diffuse aux polluants. Les points considérés comme extrêmes proviennent de la base de données du canton de Schaffhouse et correspondent à des sols suspectés d'être contaminés par des chlorophénols (Zennegg, communication personnelle). Les chlorophénols sont des composés aromatiques produits par halogénéation électrophile du phénol avec du chlore. Certains des phénols sont utilisés comme pesticides et herbicides ce qui pourrait expliquer leur présence dans ces sols.

2. Quantification de l'exposition aux PCDD/Fs et PCBs issus de sources environnementales diffuses des troupeaux de vaches allaitantes suisses

Les graphiques présentant les concentrations pour les sommes des PCDD/Fs, dl-PCBs et ndl-PCBs pour chacune des sept catégories de rations offertes aux vaches allaitantes, selon trois niveaux d'ingestion de sol en hiver et en été selon les situations « mid-bound » et « upper-bound » sont présentées en Annexe 3.

Pour les graphiques présentant les sommes des concentrations en PCDD/Fs et PCBs des rations « Bergzone IV » et « Ration concentrés » (figure 11) avec 0, 1 ou 9% de sol, la ML fixée pour chaque type de polluant n'est pas représentée car celle-ci est située bien au-delà des valeurs de concentration obtenues pour chaque ration. Cependant, bien que la ML fixée dans la ration ne soit pas atteinte, certains scénarios présentent tout de même des risques de contamination de la viande et du lait, selon les calculs basés sur les TR de la ration vers le lait et les BCF de la ration vers le tissu adipeux. Il s'agit essentiellement des cas où l'ingestion de sol est élevée et les aliments contaminés aux niveaux Q3 et D9.

Cas des PCDD/Fs

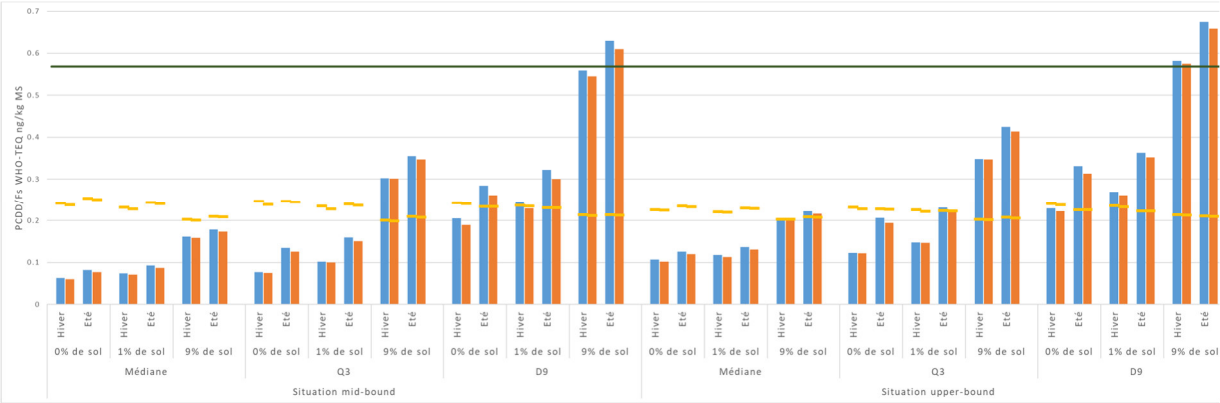
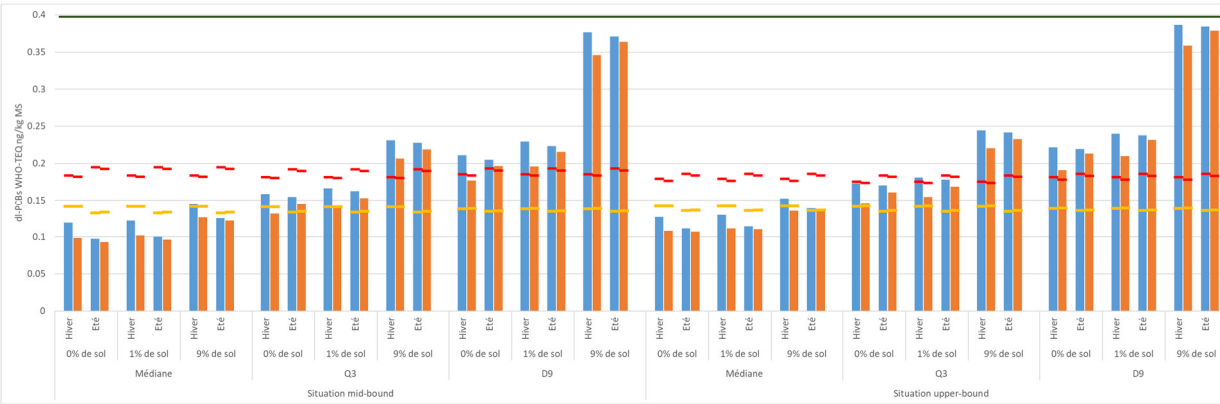


Figure 11 : Concentrations pour les sommes des PCDD/Fs, dl-PCBs et ndl-PCBs des rations d'élevages de vaches allaitantes de zones de montagne IV (« Bergzone IV ») et d'élevages utilisant des concentrés (« Ration concentrés »).
Source : personnelle

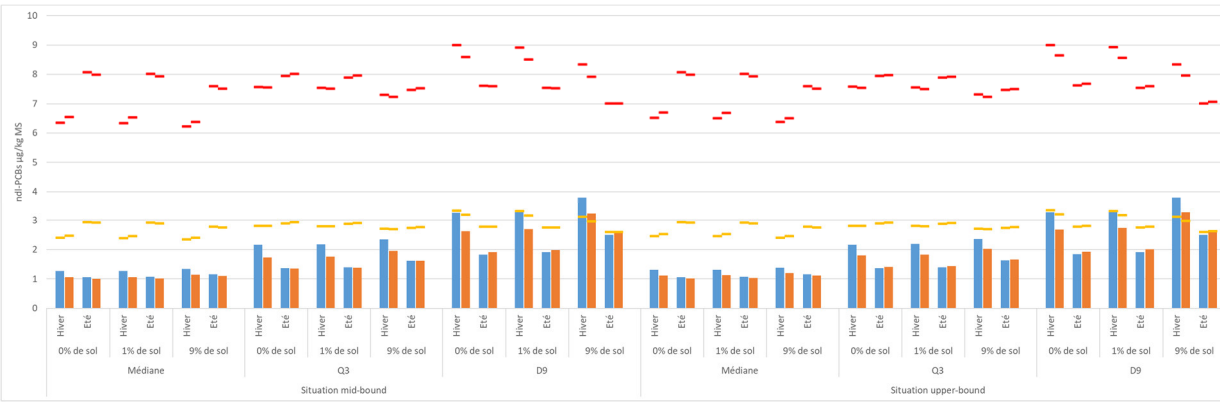
Cas des dl-PCBs



Légende :

- Bergzone IV
- Ration concentrés
- AL WHO-TEQ
- Limite à partir de laquelle la ML du lait est dépassée
- Limite à partir de laquelle la ML de la viande est dépassée

Cas des ndl-PCBs



IV. Critiques méthodologiques

1. Effectifs limitants concernant les données de concentrations en PCDD/Fs et PCBs des aliments composant les rations de vaches allaitantes

Les concentrations en PCDD/Fs et PCBs des aliments composant la ration offerte aux vaches allaitantes ont été déterminées à partir d'analyses réalisées indépendamment sur des aliments du commerce dans le cadre du contrôle officiel des aliments et sur quelques fourrages analysés dans le cadre d'études expérimentales. Ainsi, les taux de contamination obtenus pour chaque aliment ne tiennent pas compte des différences de niveaux de contamination environnementale existantes entre les zones géographiques d'élevage définies lors de l'élaboration des rations offertes aux vaches allaitantes. Les zones situées à proximité de zones d'activité industrielle ou de villes sont plus sujettes aux dépôts atmosphériques de polluants, ou bien encore des prairies inondées lors de crues peuvent être soumises à des dépôts de sédiments contaminés, donc les fourrages produits et les aires pâturées présentent de plus grands risques de contamination en PCDD/Fs et PCBs que d'autres zones moins exposées.

De plus, la portée générique des estimatifs de niveau de contamination des rations reste limitée car certaines catégories d'aliments ne possédaient pas suffisamment de données. C'est par exemple le cas des taux de contamination en ndl-PCBs de l'ensilage de maïs pour lequel seule une donnée a pu être obtenue. Il faudrait donc pouvoir créer une base de données centralisée permettant de recueillir des données éparées émanant des offices fédéraux, mais aussi des cantons, et pourquoi pas à terme des autocontrôles de l'industrie des aliments pour le bétail. Il apparaît également nécessaire que les plans de contrôle et de surveillance officiels pour l'alimentation animale ciblent à l'avenir les fourrages pour lesquels nous n'avons que peu de données et qui sont pourtant la source principale de contamination en POPs des ruminants, et plus uniquement les aliments concentrés. En effet, le contrôle des aliments concentrés permet de sécuriser uniquement les systèmes d'élevage monogastrique (porc et volailles), dont la consommation des produits ne représente que 10% de l'exposition humaine aux POPs (Figure 3), contre 72% pour les produits de ruminants. Ainsi il apparaît judicieux de mobiliser une part du budget dédié aux analyses de POPs du plan de contrôle officiel des aliments que réalise Agroscope vers les fourrages.

2. Incertitudes liées au taux d'ingestion de sol par les bovins

La quantité de sol ingérée involontairement par les vaches au pâturage est un paramètre très sensible dans les calculs d'exposition aux POPs des animaux car le sol est la plus grande source d'exposition diffuse aux POPs. Il est donc nécessaire de définir plus précisément ce paramètre par le biais de l'étude d'un cas pratique spécifique. En effet, la quantité de sol ingérée involontairement par les vaches au pâturage dépend des conditions de pâturage, telles que l'état du pré, le chargement, les caractéristiques physico-chimiques du sol (sol portant ou non), ou encore le comportement alimentaire des animaux au pâturage. Si ces conditions sont défavorables, les animaux auront tendance à collecter l'herbe plus près du sol, à augmenter le piétinement, souillant l'herbe par du sol, en augmentant ainsi le taux d'ingestion de sol (Chatelet et al., 2015). Ainsi, le risque d'exposition aux polluants des vaches par l'ingestion de sol varie individuellement selon les cas d'études. Les données relevées de la littérature sur les taux d'ingestion de sol par les bovins à la pâture concernaient principalement des études réalisées sur des vaches laitières et ne sont donc pas forcément représentatives des élevages de vaches allaitantes dont le comportement au pâturage peut être différent.

3. Effectifs limitants concernant les données de concentrations en PCDD/Fs et PCBs des sols agricoles de Suisse

Les concentrations en PCDD/Fs et PCBs des sols agricoles suisses ont été déterminées à partir d'analyses réalisées indépendamment sur des sols agricoles de Suisse, ne tenant ainsi pas compte des différences d'exposition entre les zones géographiques d'élevages comme pour le cas des concentrations en PCDD/Fs et PCBs des aliments.

Par comparaison entre la base de données complète et le pool d'analyses de sols réalisées par Zennegg M. et al dans le cadre d'une étude sur la pollution dans les sols de jardins potagers du canton de Schaffhausen menée en 2020 (données non-publiées), on constate que la médiane des sols agricoles obtenue est, pour les PCDD/Fs, légèrement inférieure à celle obtenue pour les sols ruraux du canton de Schaffhausen, et quasi similaire dans le cas des dl-PCBs car 83% des données proviennent de ces analyses de sol. Pour assurer la robustesse de ces résultats, il faudrait obtenir plus de données sur les taux de contamination en PCDD/Fs et PCBs des sols agricoles de Suisse. Le cas des sols urbains, exclu en première intention de notre analyse, mérite par ailleurs d'être traité également sachant que dans certains cas des vaches allaitantes peuvent être élevées en zone péri-urbaine à proximité immédiate de villes ou zones industrielles potentiellement émettrices de POPs.

4. Limitations liées à l'extrapolation des taux de transfert de la ration vers le lait depuis le cas des vaches laitières vers celui des vaches allaitantes

Les TR et les BCF sont deux concepts communément utilisés pour décrire le transfert des contaminants depuis l'alimentation animale vers les denrées alimentaires d'origine animale. Néanmoins, leur signification est conditionnée par plusieurs paramètres. La principale limite dans l'étude du transfert des POPs *in vivo* consiste en l'atteinte de l'état d'équilibre du bilan entrée-sortie. Cette condition d'équilibre n'est que rarement atteinte dans le cas de polluants persistants à la demi vie d'élimination longue, ainsi que dans le cas d'animaux dont le statut physiologique et les dynamiques lipidiques évoluent rapidement au cours du cycle de production. Par conséquent, de nombreux auteurs ont donc choisi de calculer le temps d'exposition nécessaire via la demi-vie du composé cible. Mais dans ces cas, les expériences étaient généralement basées sur un groupe de congénères alors que la demi-vie peut varier considérablement entre les différents congénères d'une même famille. Ainsi, la détermination du temps d'exposition minimal sera toujours un compromis subjectif mais doit viser à se rapprocher le plus possible des conditions d'équilibre chez la vache.

De plus, les données de TR relevées sont issues d'études effectuées sur des vaches laitières hautement productrices dont la production moyenne est de 23 kg de lait par jour (Amutova et al., 2021). Ainsi, ces vaches possèdent des taux de transfert des PCDD/Fs et PCBs vers le lait peut-être plus élevés que pour les vaches allaitantes qui sont bien moins productrices avec en moyenne 6,8 kg de lait par jour (Sepchat B. et al., 2017). En effet, la dynamique des lipides dans l'organisme des vaches allaitantes diffère de celle des vaches laitières pour lesquelles les lipides sont mobilisés de manière intense en début de lactation afin de soutenir la production laitière.

Tableau 8 : Mesures de précaution pour réduire les contaminations en PCBs pour l'ensemble des exploitations de production de viande basée sur les herbages et l'élevage allaitant

Source : OFAG, 2019

Domaine	Mesure	But	Efficacité	Charge
Conservation des aliments pour animaux	Récolter exclusivement du fourrage propre	Réduire l'ingestion de terre	Élevée	Plutôt faible
Gestion du pâturage	Passage de la herse étrille, roulage, sursemis et semis de complément	Favoriser une couche herbeuse dense et fermée avec des espèces adaptées aux conditions locales pour réduire l'ingestion de terre	Moyenne	Plutôt faible
Gestion du pâturage	Lutter contre l'action des taupes ou des souris qui remuent la terre	Réduire la souillure du fourrage et l'ingestion de terre	Moyenne	Plutôt faible
Gestion du pâturage	Adapter l'occupation et la durée de pâturage à l'effectif, privilégier des phases de pâturage courtes et une rotation rapide	Empêcher une sollicitation excessive et un endommagement de la couche herbeuse, ainsi qu'un abrouissement trop profond ; réduire l'ingestion de terre	Moyenne	Plutôt faible
Gestion du pâturage	Prévoir suffisamment de refus de pâture (env. 20 % de la végétation destinée à l'alimentation des animaux) et contrôler la profondeur d'abrouissement (objectif : entre 3 et 5 cm à l'endroit brouté le plus profondément)	Empêcher une sollicitation excessive et un endommagement de la couche herbeuse, ainsi qu'un abrouissement trop profond ; réduire l'ingestion de terre	Moyenne	Plutôt faible
Conservation des aliments pour animaux	Régler soigneusement les tondeuses, les andaineurs et les ramasseurs ; viser une hauteur de coupe de 7 à 8 cm	Réduire la souillure du fourrage ; accroître la qualité de la nourriture pour animaux	Moyenne	Plutôt faible
Conservation des aliments pour animaux	Éviter des charges mécaniques trop fortes sur la couche herbeuse ; faire circuler les engins uniquement sur les sols suffisamment résistants	Empêcher l'endommagement de la couche herbeuse	Moyenne	Plutôt faible
Gestion du pâturage	Effectuer une coupe de nettoyage à l'automne après la dernière utilisation	Éliminer l'ancien fourrage souillé ; favoriser une couche herbeuse dense	Plutôt faible	Plutôt faible
Gestion du pâturage	Éviter le pâturage sur un sol trop mouillé	Réduire l'endommagement de la couche herbeuse et l'ingestion de terre	Plutôt faible	Plutôt faible
Conservation des aliments pour animaux	Éviter de circuler sur le fourrage fauché	Réduire la souillure du fourrage ; améliorer la qualité de la nourriture pour animaux	Plutôt faible	Plutôt faible
Conservation des aliments pour animaux	Éviter un fanage/andainage trop fréquent	Réduire la souillure du fourrage ; améliorer la qualité de la nourriture pour animaux	Plutôt faible	Plutôt faible
Conservation des aliments pour animaux	Faire pâturer plutôt que faucher les parcelles fortement infestées de taupes ou de souris	Réduire la souillure du fourrage	Plutôt faible	Plutôt faible

Certains scénarios d'élevage de vaches allaitantes présentent des risques accrus d'exposition aux POPs et potentiellement de dépassement des limites maximales réglementaires dans la viande et le lait. Les estimations concernant les durées de demi-vie et les taux de décomposition dans le sol des PCDD/Fs et PCBs fluctuent entre 10 et 100 ans, voire au-delà (OFAG, 2019). Par ailleurs, de nombreux autres polluants organiques émergents continuent d'être produit par l'homme et finissent par rejoindre l'environnement, allongeant régulièrement la liste de la convention de Stockholm (exemples : chloroparaffines, retardateurs de flammes bromés, composés perfluorés). Ainsi, le problème de remontée dans les chaînes alimentaires animales des POPs continuera d'être une préoccupation majeure pour la durabilité des élevages au cours des prochaines décennies. Par conséquent, différents leviers d'action doivent donc être mis en œuvre afin de prévenir ces risques d'exposition. La présente étude révèle que la plus grande source d'exposition diffuse aux POPs est l'ingestion de sol. Différentes mesures préventives existent sur la réduction d'ingestion de terre par les animaux pour tous les types d'exploitations. Les mesures de précaution pour réduire les contaminations en PCBs pour l'ensemble des exploitations de production de viande basée sur les herbages et l'élevage allaitant sont présentées Tableau 8. Ces mesures reposent essentiellement sur des mesures de précaution dans la récolte et le stockage des fourrages pour réduire au mieux leur souillure par du sol, mais aussi dans la gestion du pâturage. Le Tableau 9 présente les mesures de réduction des contaminations en PCBs critiques pour les exploitations de production de viande basée sur les herbages et l'élevage allaitant. Il s'agit de mesures complémentaires de gestion aux mesures de préventions dans le cas où ces dernières ne suffiraient pas à long terme à réduire l'ingestion de terre par les bovins et par conséquent la contamination en PCBs. Ces mesures suggèrent dans certains cas une réorientation de l'élevage pour lequel la production d'animaux de rente herbivores ne serait pas adaptée aux conditions locales, caractérisés par des niveaux de contamination environnementaux supérieurs au bruit de fond médian national. Si ces mesures ne permettent pas d'éviter des cas de contaminations accidentelles dans certains élevages, des cas de crises sanitaires émergents vont induire, au-delà des dommages économiques, un stress psychologique pour les éleveurs qui se retrouvent alors sous la pression des autorités avec à leur charge des frais de gestion et d'administrations élevés. Il est donc important de renforcer le conseil et la formation auprès des agriculteurs sur les bonnes pratiques agricoles afin de mettre en œuvre des mesures préventives efficaces et ainsi d'éviter des scénarios critiques.

De plus, au vu des résultats de cette étude et des cas encore émergents de contamination, des normes plus restrictives doivent être envisagées, telles que par exemple un abaissement de la ML en POPs dans la ration afin de pouvoir mieux anticiper les cas de contamination des produits. Il est par ailleurs d'ores et déjà judicieux d'anticiper de nouvelles normes pour les POPs émergents, pour lequel la démarche de la présente étude basée sur l'agrégation de bases de données éparses, constitue un cadre méthodologique adéquat.

Tableau 9 : Mesures de réduction des contaminations en PCBs critiques pour les exploitations de production de viande basée sur les herbages et l'élevage allaitant

Source : OFAG, 2019

Domaine	Mesure	But	Efficacité	Charge
Sevrage/abattage	Prolongation de la période entre le sevrage et l'abattage	Les animaux sont sevrés un à deux mois avant l'abattage.	Moyenne	Élevée en raison de la suppression du label
Alimentation	Le troupeau est détenu à un autre emplacement pendant l'été (alpage).	Une partie de la durée d'engraissement se déroule dans une exploitation avec du fourrage non contaminé.	Moyenne	Faible
Alimentation	À partir d'un certain âge, les animaux sont détenus dans une autre exploitation.	Une partie de la durée d'engraissement se déroule dans une exploitation avec du fourrage non contaminé.	Moyenne	Faible à moyenne
Vente d'animaux destinés à l'engraissement	Vente des animaux entre 7 et 9 mois (poids compris entre 200 et 300 kg) pour l'engraissement	Les animaux sont sevrés (ne consomment plus de lait) et engraisés dans une autre exploitation avec du fourrage non contaminé.	Élevée	Élevée en raison des pertes financières
Changement d'alimentation	Ensilage de maïs pour l'affouragement	Accroissement de la densité énergétique des rations ; meilleure protection et croissance plus rapide des animaux, qui absorbent moins de PCB et de dioxines	Élevée (mesure la plus efficace parmi toutes celles recommandées)	Élevée (culture ou achat de maïs, suppression potentielle des contributions et des labels)
Changement d'alimentation	Hausse de la proportion d'aliments concentrés dans les rations	Accroissement de la densité énergétique des rations ; meilleure protection et croissance plus rapide des animaux, qui absorbent moins de PCB et de dioxines	Moyenne	Moyenne
Élevage	Croisement de races précoces (p. ex. Angus)	Les animaux précoces fixent davantage de graisse, plus tôt, ce qui améliore leur protection et réduit les teneurs en PCB et en dioxines dans la graisse.	Moyenne	Moyenne (gestion plus exigeante pour la race bovine Angus que pour la limousine)

Afin de déterminer plus précisément le taux d'ingestion de sol par les bovins à la pâture et ainsi d'étayer l'estimation sur le taux de contamination des élevages bovin viande en Suisse, un essai expérimental a été mis en place en été 2021 par Agroscope. Cet essai a eu lieu sur le site de la Frêtaz sur une prairie permanente et pour des bovins en croissance dans le cadre du projet Regio-Beef 03. Ce projet a pour but d'évaluer « l'efficacité de trois différents types génétiques de bovins dans les systèmes d'alimentation correspondant aux régions de montagne ». Dans le cadre de cet essai, des mesures sur l'ingestion de sol par les bovins ont été effectuées. Les résultats de cette étude quant à la mesure de l'ingestion de sol par les bovins à la pâture permettront ainsi d'étayer les valeurs d'ingestion de sol choisies dans ce volet du projet MeatPOP.

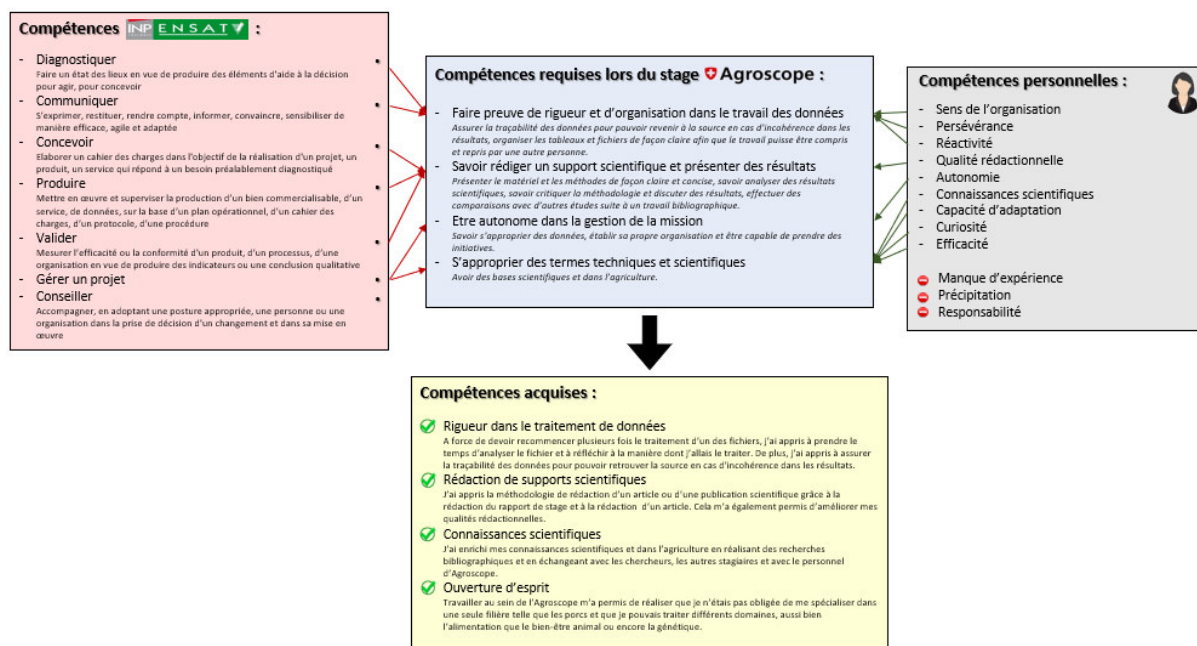


Figure 12 : Compétences ENSAT, requises, mobilisées, et acquises lors de ce stage

Source : personne

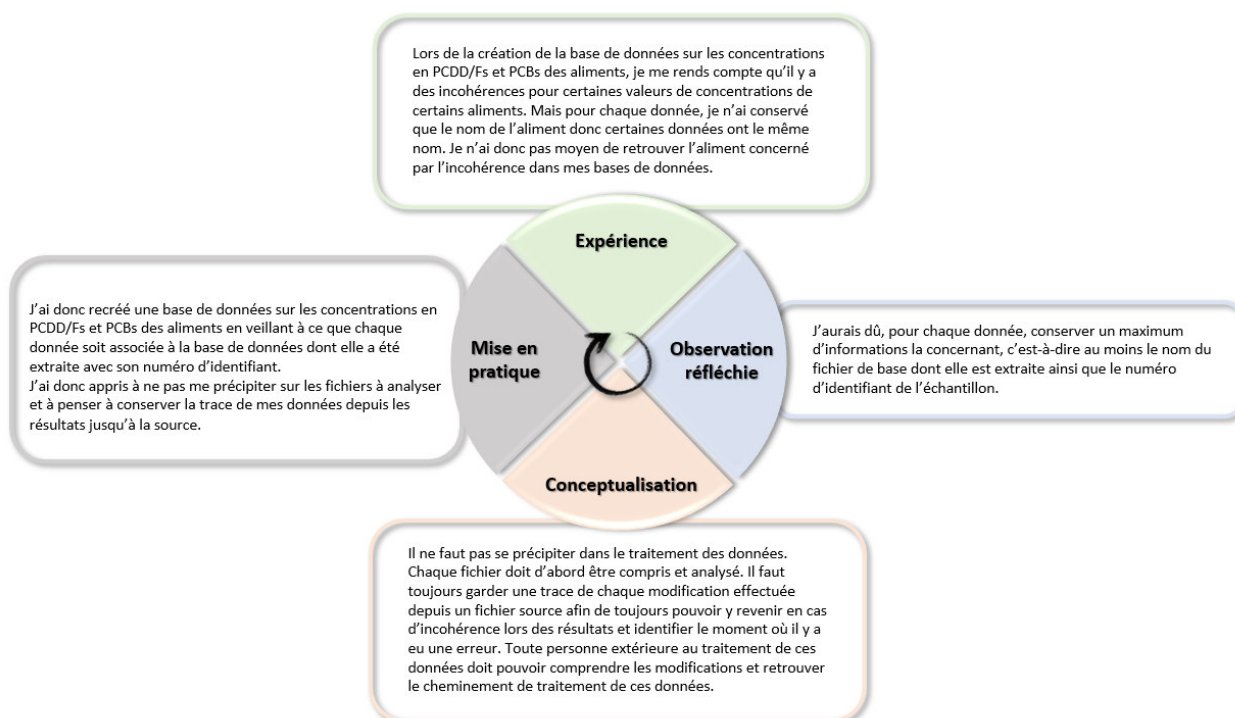


Figure 13 : Cycle de Kolb ciblant le cas particulier de la rigueur dans le traitement des données.

Source : personne

Conclusion

Les résultats de ce stage permettent d'ores et déjà de rendre compte objectivement et semi-quantitativement de la situation quelques fois sensible quant à l'exposition aux PCDD/Fs et PCBs des troupeaux de vaches allaitantes suisses. Ainsi, cette étude permettra de renforcer les mesures de conseil auprès des éleveurs, de développer les programmes de recherche autour de la problématique des POPs dans l'agriculture, et d'appuyer les mesures de contrôle déjà en place pour réduire les épisodes de contamination. Le présent rapport va également constituer un support pour la préparation d'articles scientifiques et de vulgarisation sur l'exposition aux PCDD/Fs et PCBs des troupeaux de vaches allaitantes en Suisse. Un premier article à destination de la filière vache allaitante suisse a d'ores et déjà été soumis auprès de la revue professionnelle « La Vache Mère » (Vaille et Lerch, 2021, voir Annexe 4).

L'ensemble des compétences mobilisées et des compétences acquises lors de ce stage sont résumées dans la figure 12. Le cas particulier de la rigueur dans le traitement des données est illustré dans la figure 13 grâce au Cycle de Kolb. Ce cycle permet d'illustrer la montée en compétence suite à une expérience vécue, ici dans le cadre de mon stage.

Ce premier stage en entreprise, et plus particulièrement dans le secteur de la recherche, m'a permis d'avoir une première immersion dans le monde professionnel. J'ai ainsi appris à avoir des responsabilités et j'ai gagné en autonomie de travail. Mes qualités personnelles et les compétences acquises lors de ma formation à l'ENSAT m'ont permis de satisfaire les compétences requises lors de ce stage. La réalisation de supports scientifiques va me permettre à l'avenir d'une part de gagner en efficacité lors de prochaines expériences, et d'autre part d'avoir des supports à présenter pour de futurs stages ou demandes d'emploi.

Enfin, les forces/faiblesses et opportunités/menaces d'Agroscope identifiées lors du stage sont présentées sous la forme d'une matrice SWOT (figure 14). Les plus grandes forces d'Agroscope sont sa capacité à couvrir différents domaines impliqués dans les maillons de la chaîne agroalimentaire et à transférer son savoir et la technologie par le biais de vulgarisations scientifiques, de conférences et d'autres supports de diffusion d'information. Ces transferts sont permis grâce à son vaste réseau de connaissances, à la fois au sein de la confédération Suisse mais aussi à travers le monde de par ses échanges et ses projets internationaux. Bien qu'Agroscope doive faire face à de nouveaux enjeux liés à des problématiques émergentes, le besoin croissant de développement des connaissances et des techniques en agriculture constitue une réelle opportunité pour l'entreprise. Cependant, Agroscope est sujet à de nombreuses controverses, notamment suite à certaines pratiques jugées indécentes par certains citoyens telles que l'utilisation de vaches hublot jusqu'en 2019 à Posieux.



Fi-

Figure 14 : Matrice SWOT des forces/faiblesses et opportunités/menaces d'Agroscope identifiées lors du stage

Source : personnelle

Bibliographie

ActuEnvironnement, 2005. Les POP et dioxines.

Lien : https://www.actu-environnement.com/ae/dossiers/dioxines/dioxines_definition.php4. Consulté le 10 juin 2021.

ADEME, 2017. Les polluants organiques persistants (POP).

Lien : <https://www.ademe.fr/entreprises-monde-agricole/reduire-impacts/reduire-emissions-polluants/dossier/polluants-organiques-persistants-pop/definition-sources-demission-impacts>. Consulté le 10 juin 2021.

Agroscope, 2021. A propos.

Lien : <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/fr/home/a-propos/agroscope.html>. Consulté le 21 juillet 2021.

Amutova F., Delannoy M., Baubekova A., Konuspayeva G., Jurjanz S., 2021. Transfer of persistent organic pollutants in food of animal origin - Meta-analysis of published data. *Chemosphere*. 2021 Jan;262:128351. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128351. Epub 2020 Sep 16. PMID: 33182113.

BFMTV, 2019. Incendie de l'usine Lubrizol à Rouen : des niveaux de dioxines « relativement faibles » mesurés.

Lien : https://www.bfmtv.com/societe/incendie-de-l-usine-lubrizol-a-rouen-des-niveaux-de-dioxines-relativement-faibles-mesures_AV-201910030009.html. Consulté le 21 juillet 2021.

Bodénan F., Nowak C., 2005. Dioxines dans les sols français : un premier état des lieux. Rapport BRGM RP-54202-FR, 71p., 24 fig., 8 tabl., 3ann.

Lien : <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-54202-FR.pdf>. Consulté le 2 juillet 2021.

Bogdal C., Züst S., Schmid P., Gyalpo T., Zeberli A., Hungerbühler K., Zennegg M., 2017. Dynamic transgenerational fate of polychlorinated biphenyls and chlorinated dioxins/furans in lactating cows and their offspring. *Environ. Sci. Technol.*, 51(18), pp. 10536-10545. Doi: 10.1021/acs.est.7b02968.

Chatelet A., Fournier A., Jurjanz S., Lerch S., Toussaint H., Delannoy M., Feidt C., Rychen G., 2015. L'épandage de matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les prairies comporte-t-il des risques en termes de transfert de polluants organiques et inorganiques vers la chaîne alimentaire ? *INRA Prod. Anim.*, 28, 383-398

CITEPA. Polluants organiques persistants.

Lien : <https://www.citepa.org/fr/pop/>. Consulté le 10 juin 2021.

CITEPA, 2020. Emissions de polluants de l'UE-28 : l'UE publie son inventaire au titre de la Convention de Genève. Réf. : 2020_07_a11.

Lien : https://www.citepa.org/fr/2020_07_a11/. Consulté le 22 juillet 2021.

CITEPA, 2020. Dioxines et furanes.

Lien : <https://www.citepa.org/fr/2020-pcdd-f/>. Consulté le 14 septembre 2021.

Driesen C., Zennegg M., Morel I., D. Hess H., Nowack B., Lerch S., 2021. Average Transfer Factors are not Enough: The Influence of Growing Cattle Physiology on the Transfer Rate of Polychlorinated Biphenyls from Feed to Adipose. *Chemosphere*, Volume 270, Mai 2021, 129698, ISSN 0045-6535.

Lien : <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129698>. Consulté le 2 août 2021.

Etat de Fribourg, 2020. Les effets des PCB sur la santé.

Lien : <https://www.fr.ch/daec/pila/les-effets-des-pcb-sur-la-sante>. Consulté le 3 août 2021.

Feil V. J., Huwe J.K., Zaylskie R : G., Davison K. L., 2000. Chloritaned Dibenzo-p-dioxin and Dibenzofuran Concentrations in Beef Animals from a Feeding Study. *J. Agric. Food Chem.* 2000, 48, 6163-6173.

Franceinfo, 2019. VIDEO. Lubrizol : un éleveur du Nord doit jeter 5000 litres de lait après l'incendie de l'usine chimique de Rouen ». *France 3 Hauts-de-France*.

Lien : <https://france3-regions.francetvinfo.fr/hauts-de-france/nord-0/video-lubrizol-eleveur-du-nord-doit-jeter-5000-litres-lait-apres-incendie-1730253.html>. Consulté le 23 juillet 2021.

Hoogenboom R., Traag W., Fernandes A., Rose M., 2015. European developments following incidents with dioxins and PCBs in the food and feed chain. *Food Control* 2015, 50, 670-683.

Iten A., 2012. Resultate der Fütterungsumfrage. Mutterkuh 12-4.

Jurjanz S., Feidt C., Pérez-Prieto L.A., Ribeiro Filho H. M. N., Rychen G. and Delagarde R., 2012. Soil intake of lactating dairy cows in intensive strip grazing systems. *Animal* (2012), 6:8, pp 1350–1359. The Animal Consortium 2012. Doi : 10.1017/S1751731111002734

Lauzent M., 2017. Etude de l'écodynamique des polluants organiques persistants et des micropolluants halogénés d'intérêt émergent dans les milieux aquatiques. *Chimie analytique*. Université de Bordeaux, 2017. Français. NNT : 2017BORD0733. tel-01699067

Lien : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01699067/document>. Consulté le 10 juin 2021.

Le Matin Dimanche, 2021. Les dioxines polluent nos sols mais elles sont très mal contrôlées – Les cantons ne traquent pas suffisamment les dioxines. Botti D., Gamp R., Le Matin Dimanche, 22 August 2021. 2-3.

OFAG, 2021. Plan directeur de la recherche agronomique et agroalimentaire.

OFAG, 2019. Les PCB et les dioxines dans les denrées alimentaires d'animaux de rente. 311.1/2014/00350 \ COO.2101.102.4.907281.

OMAFRA, 2021. Guide d'alimentation des vaches laitières.

Lien : <http://www.omafra.gov.on.ca/french/livestock/dairy/facts/pub101.htm#cons1>. Consulté le 15 août 2021.

OSAV, 2020. Directive 2020/4 : Interprétation des dépassements de valeurs maximales de paramètres chimiques et physiques dans les denrées alimentaires. 311.2/2015/00085 \ COO.2101.102.5.999435 \ 202.02.03.01

Schmid P., Gujet E., Zennegg M., D. Bucheli T., Desaulles A., 2005. Correlation of PCDD/F and PCB concentrations in soil samples from the Swiss soil monitoring network (NABO) to specific parameters of the observation sites. *Chemosphere* 58 (2005), 227-234. Doi: 10.1016/j.chemosphere.2004.08.045

Sepchat B., D'HOUR P., AGABRIEL J., 2017. Production laitière des vaches allaitantes : caractérisation et étude des principaux facteurs de variation. *INRA Productions Animales* 30, No. 2, 139-152.

Vaille et Lerch, 2021. Evaluation du risque de contamination aux PCBs des vaches mères suisses depuis la ration et le sol. *La Vache Mère* 21-4, Soumis le 4 octobre 2021.

Zennegg M., 2018. Dioxins and PCBs in Meat – Still a Matter of Concern?. *CHIMIA* 2018, 72, No. 10., p. 690-696. Doi : 10.2533/chimia.2018.690.

Annexes

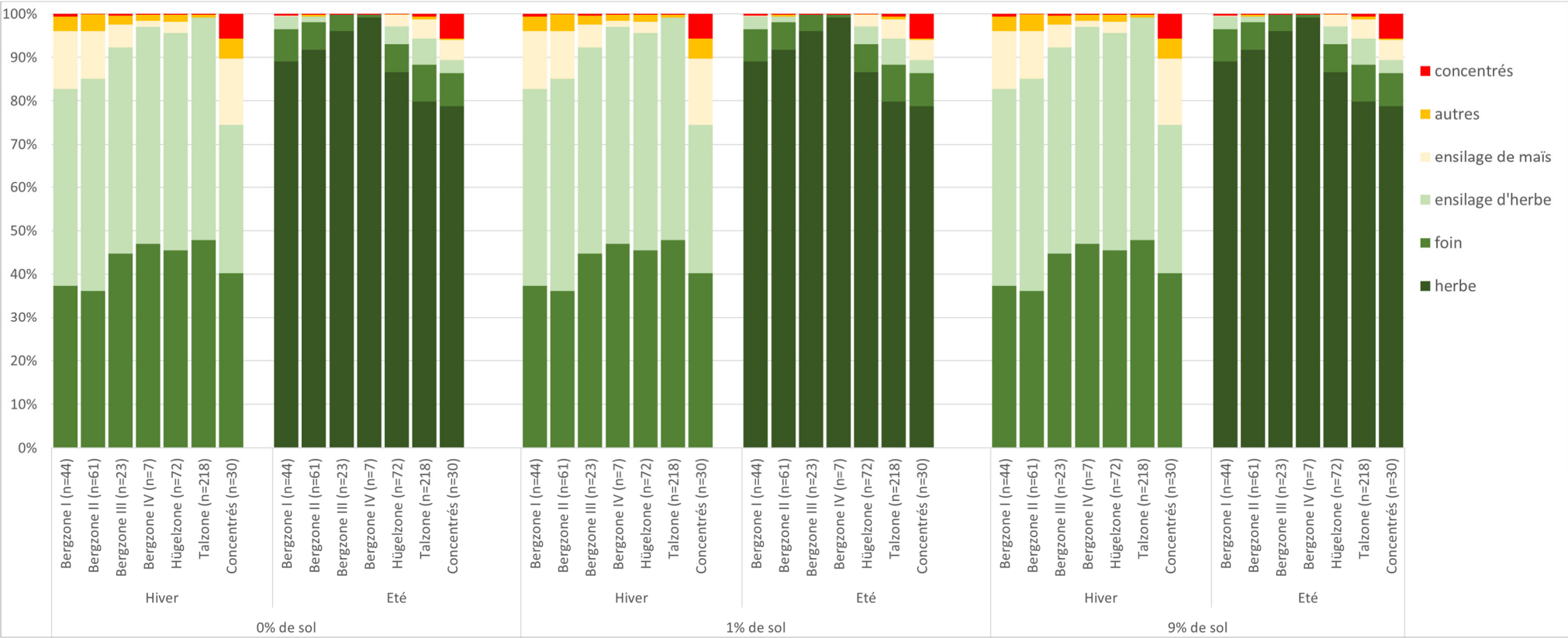
Annexe 1 : Proportions des six catégories d'aliments dans les sept catégories de rations et les périodes hivernale ou estivale des vaches allaitantes suisses selon trois niveaux d'ingestion de sol	30
--	----

Annexe 2 : Profil en dix-sept congénères de PCDD/Fs, douze dl-PCBs et six ndl-PCBs dans les six catégories d'aliments composants les rations des vaches allaitantes.....	31
--	----

Annexe 3 : Concentrations pour les sommes de PCDD/Fs, dl-PCBs et ndl-PCBs pour sept types de rations de vaches allaitantes et trois niveaux d'ingestion de sol, en périodes hivernale et estivale, et en situations « mid-bound » et « upper-bound ».....	32
---	----

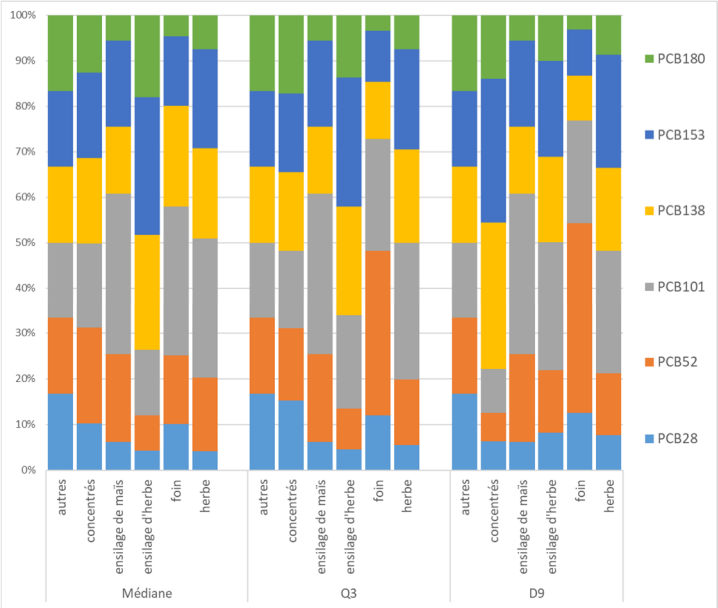
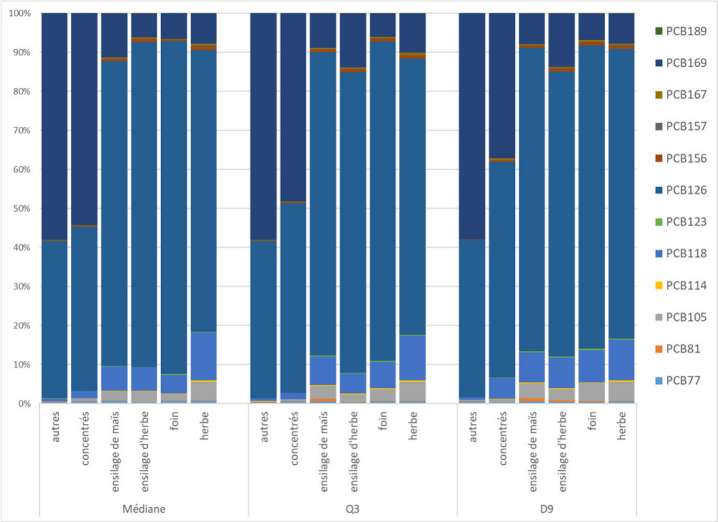
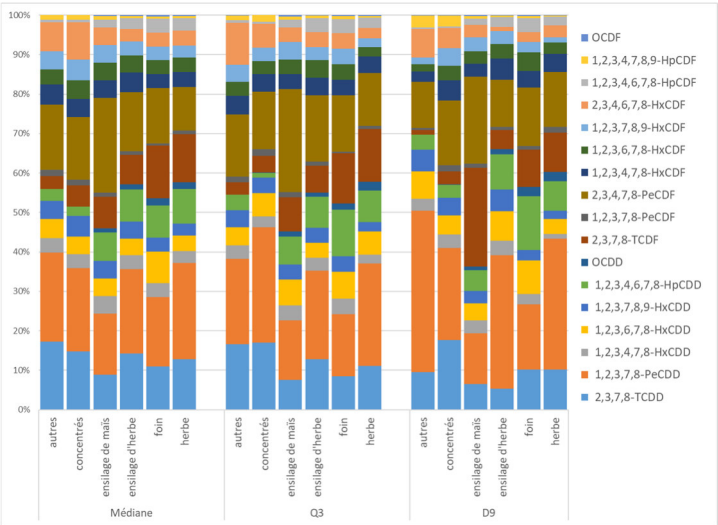
Annexe 1 : Proportions des six catégories d'aliments dans les sept catégories de rations et les périodes hivernale ou estivale des vaches allaitantes suisses selon trois niveaux d'ingestion de sol

Source : *personnelle d'après Iten A., 2012*



Annexe 2 : Profil en dix-sept congénères de PCDD/Fs, douze dl-PCBs et six ndl-PCBs dans les six catégories d'aliments composants les rations des vaches allaitantes

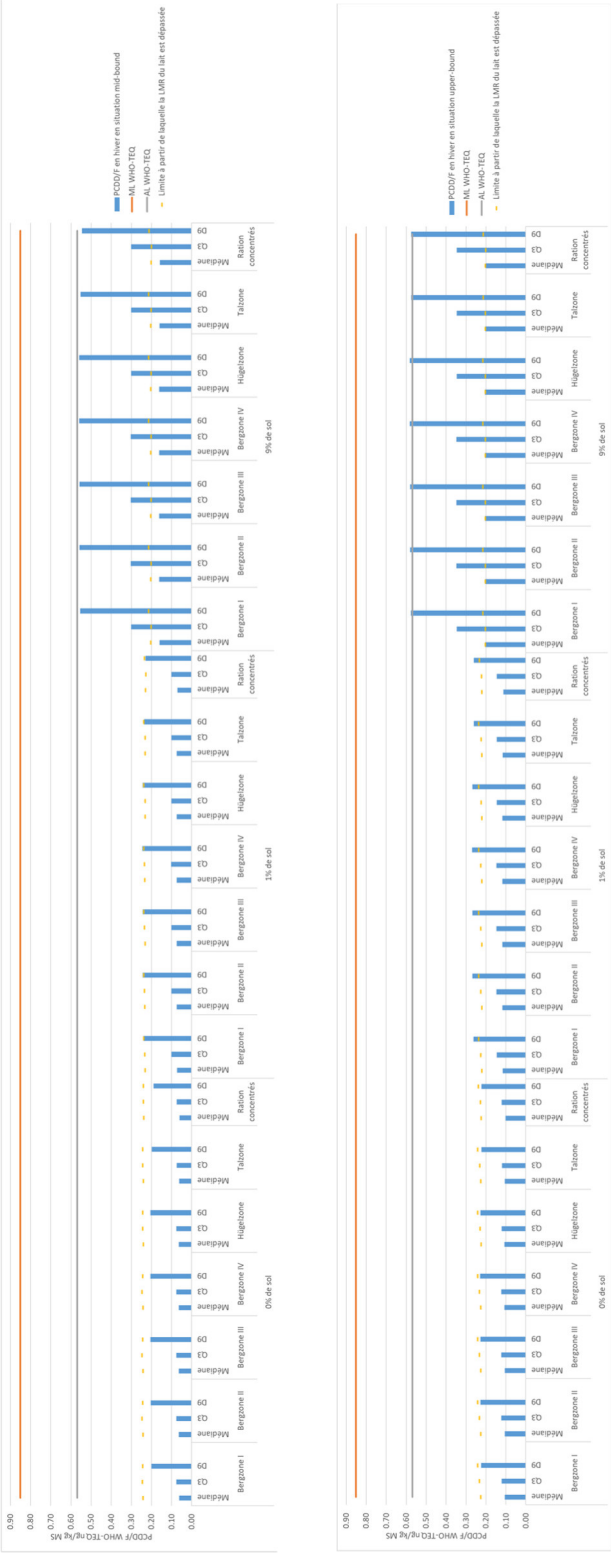
Source : personnelle



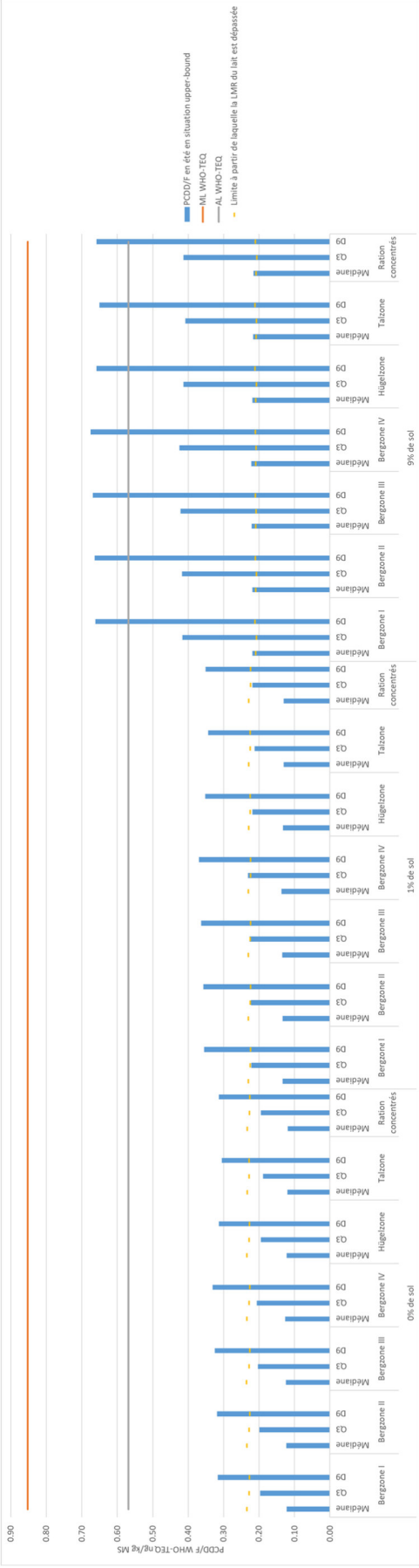
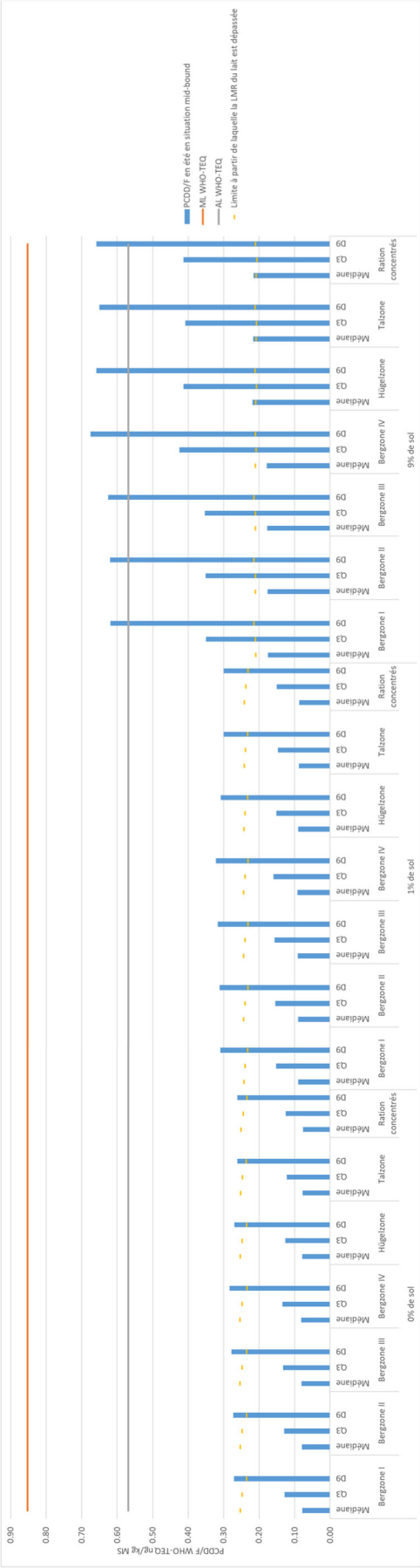
Annexe 3 : Concentrations pour les sommes de PCDD/Fs, dl-PCBs et ndl-PCBs pour sept types de rations de vaches allaitantes et trois niveaux d'ingestion de sol, en périodes hivernale et estivale, et en situations « mid-bound » et « upper-bound »

Source : *personnelle*

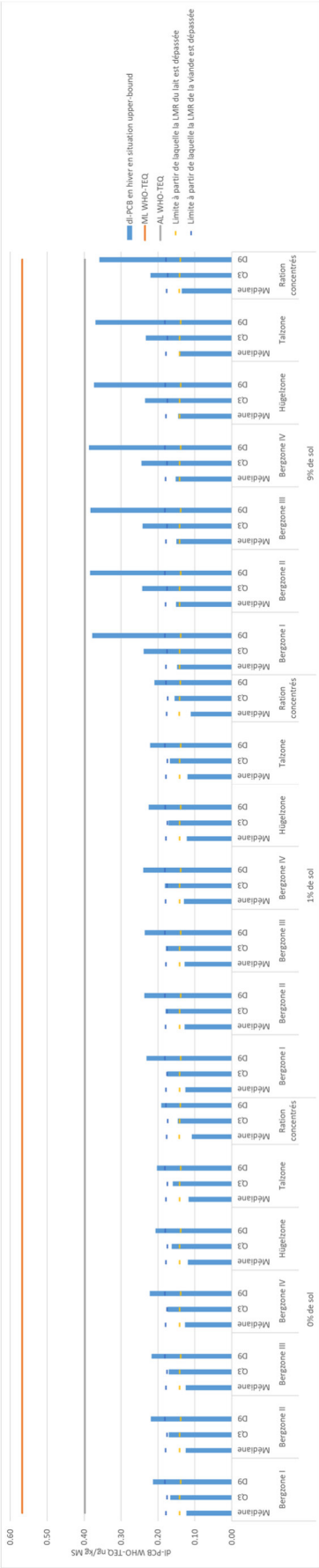
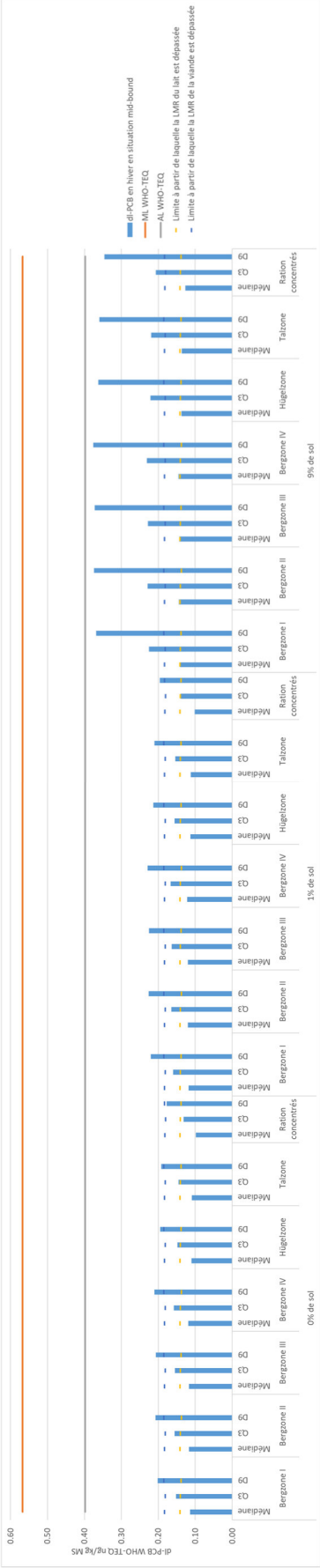
Cas des PCDD/Fs en Hiver :



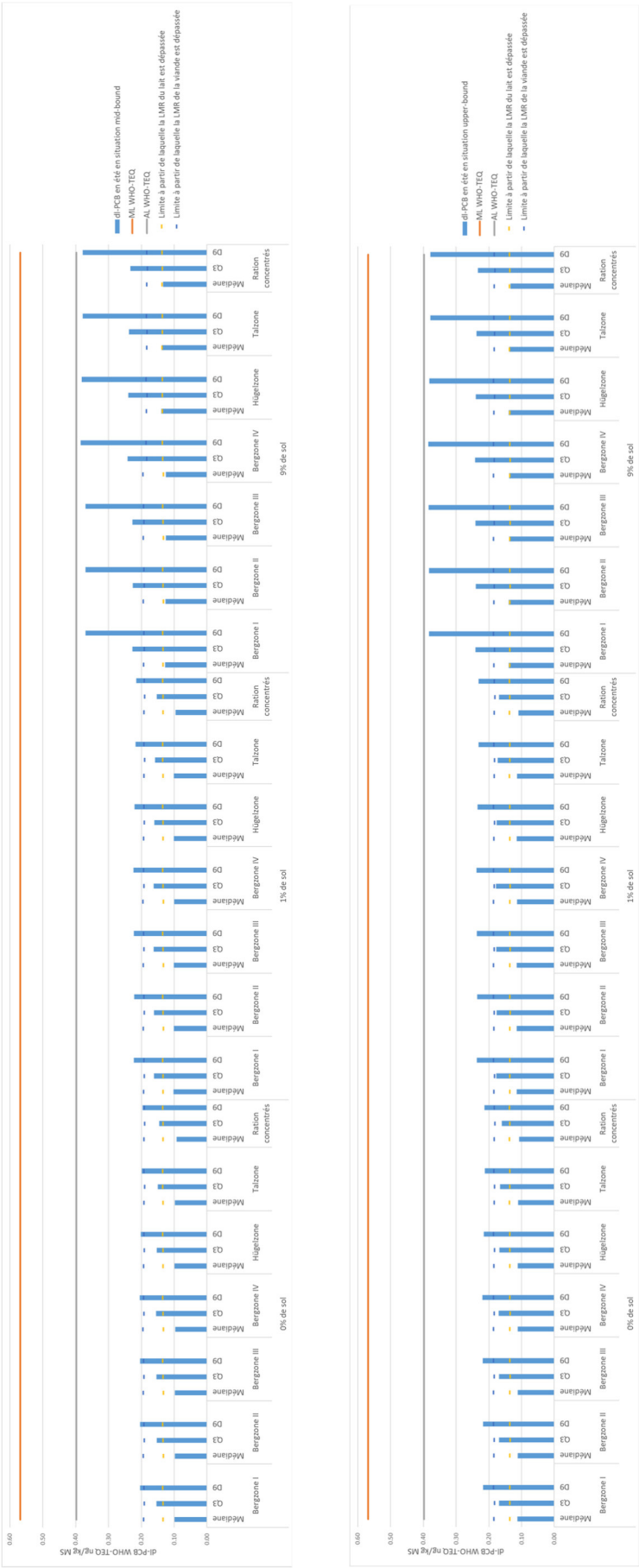
Cas des PCDD/Fs en Été :



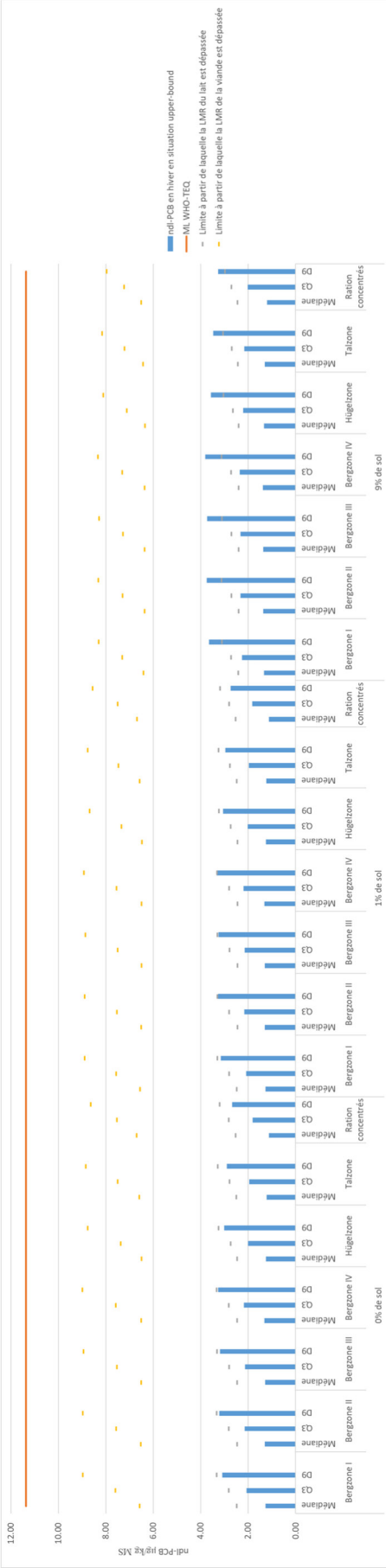
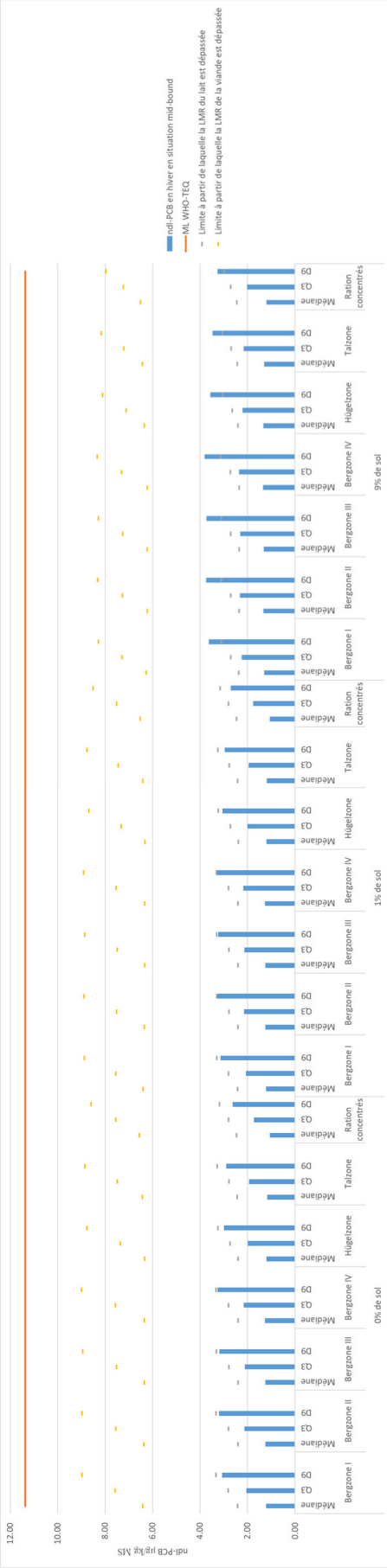
Cas des dl-PCBs en Hiver :



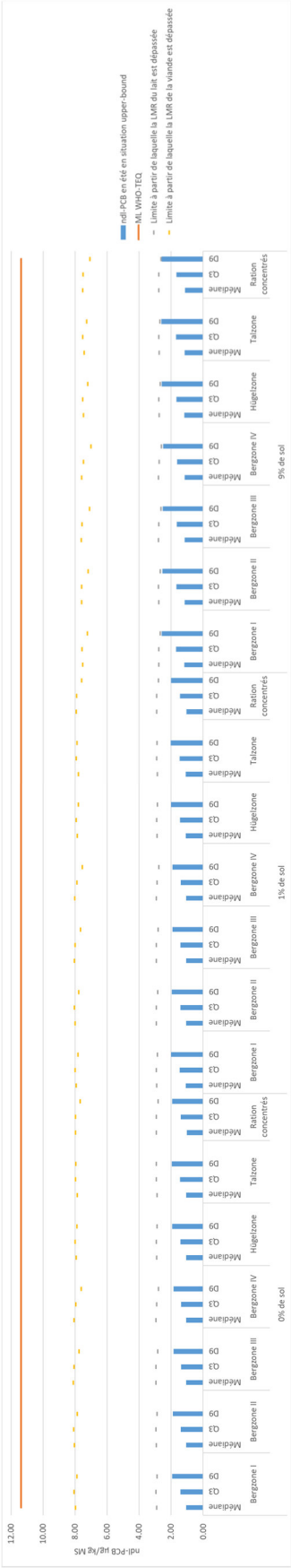
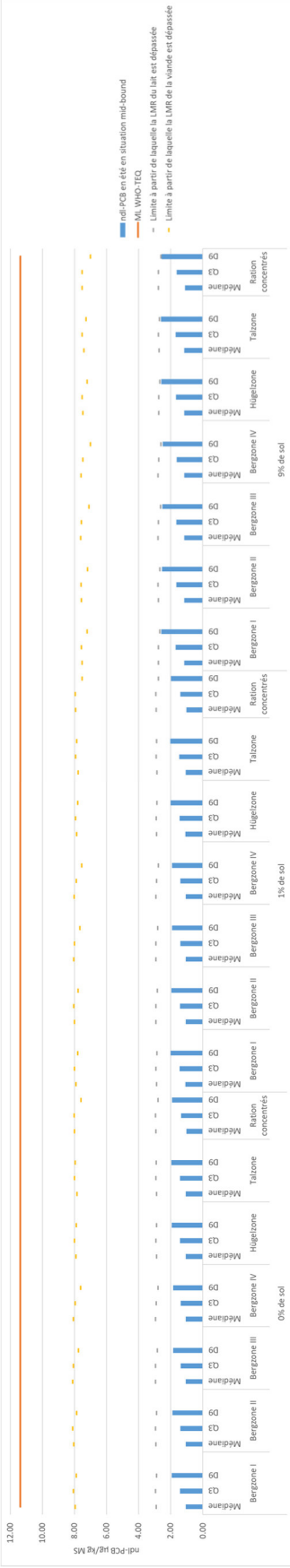
Cas des dl-PCBs en Eté :



Cas des ndl-PCBs en Hiver :



Cas des ndl-PCBs en Été :



Annex 3:

Communication at the « 25^{ème} Rencontres Recherches Ruminants » congress (online conference, 2-3 Decembre 2020).

Albechaalany J., Loncke C., Driesen C., Schmidely P., Ortigues-Marty I., Agabriel J., Zennegg M., Sauvant D., Lerch S. 2020. Modèle mécaniste du transfert des contaminants lipophiles chez le bovin en croissance. 25^{ème} Rencontres Recherches Ruminants. 02.12.2020, Ed. INRAE / Idele, Paris. p. 477. (In French)

Modèle mécaniste du transfert des contaminants lipophiles chez le bovin en croissance

Mechanistic model of lipophilic contaminant transfer in growing cattle

ALBECHAALANY J. (1-3), LONCKE C. (1), DRIESEN C. (2), SCHMIDELY P. (1), ORTIGUES-MARTY I. (4), AGABRIEL J. (4), ZENNEGG M. (2), SAUVANT D. (1), LERCH S. (3)

(1) Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR Modélisation Systémique Appliquée aux Ruminants, 75005, Paris

(2) Empa, Laboratory for Advanced Analytical Technologies, 8600 Dübendorf, Suisse

(3) Agroscope, Groupe de Recherche Ruminants, Tioleyre 4, 1725 Posieux, Suisse

(4) INRAE, Université Clermont Auvergne, Vetagro Sup, UMRH, 63122 Saint-Genès-Champanelle

INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies, les élevages de ruminants ont été épisodiquement confrontés à des expositions accidentelles aux contaminants lipophiles (ex. dioxines, PCB) générant d'importants dommages économiques et sociaux (Zenegg, 2018). La viande bovine issue d'élevage allaitant est sensible à cette problématique de sécurité sanitaire. En effet, un plan de surveillance allemand a révélé que 10% des échantillons de viande de veau sous la mère présentaient des concentrations en PCB au-delà de la teneur maximale réglementaire (BVL, 2016). L'évaluation des risques de contamination en élevage repose sur l'acquisition de données expérimentales du transfert des contaminants vers la viande (Driesen *et al.*, 2019). La grande diversité des contaminants et des systèmes d'élevage rend compliquée cette évaluation au cas par cas. Afin de mieux appréhender cette complexité, l'objectif de ce travail est d'initier la conception d'un modèle mécaniste pour le bovin en croissance. L'originalité consiste à coupler un modèle générique décrivant le transfert d'un contaminant lipophile depuis l'ingéré vers les compartiments tissulaires à deux autres modèles représentant les dynamiques digestive et corporelle des lipides.

1. MATERIEL ET METHODES

Le modèle de transfert décrit l'absorption, la distribution, le métabolisme et l'excrétion (ADME) de contaminants différant par le taux de clairance métabolique et le degré de lipophilicité définie par le coefficient de partition entre octanol et eau (K_{ow}), au sein de différents types de bovins en croissance (race, sexe) conduits selon divers itinéraires de production. Le transfert du contaminant est représenté depuis l'ingéré jusqu'aux intestins où une fraction est excrétée via les fèces et une autre diffuse vers le sang de manière réversible (McLachlan, 1994). Depuis le sang, le contaminant est distribué vers les tissus adipeux (vers le sous-compartiment perfusé par advection, puis vers le profond par diffusion ; Lerch *et al.*, 2018), les muscles, le foie et le reste du corps par advection selon leur niveau d'irrigation sanguine. La clairance métabolique est représentée au niveau du foie (Figure 1). Le transfert dynamique au sein de la sphère digestive est assuré via le couplage à un modèle de digestion des lipides basé sur les équations du système d'alimentation INRA (2018). La distribution tissulaire est dépendante de la dynamique des lipides corporels calée sur le couplage au modèle mécaniste de croissance « MECSIC » (Hoch et Agabriel, 2004). Un développement spécifique permet l'allocation des lipides de la carcasse et du 5^{ème} quartier issus de MECSIC vers les compartiments tissulaires du modèle ADME. Des simulations des concentrations en contaminants dans le muscle sont obtenues pour un taurillon Charolais de 200 à 600 kg PV recevant une ration riche (EM+ ; 12,5 MJ EM soit 1,09 UFV/kg MS) ou

pauvre (EM- ; 9,0 MJ EM soit 0,66 UFV/kg MS) en énergie (intensités de croissance contrastées). Les rations contenaient 0,4 ng/kg MS (seuil d'intervention légal pour les PCB « dioxin-like ») d'un contaminant de clairance métabolique faible ($0,2 \text{ j}^{-1}$), modérément ($K_{ow} 10^5$) ou hautement ($K_{ow} 10^9$) lipophile. Pour une série de simulations, une phase de décontamination a été incluse (0,4 ng/kg MS pour PV ≤ 400 kg, puis 0,0 ng/kg pour PV > 400 kg). Le facteur de biotransfert [BTF, concentration muscle (ng/kg lipides) / ingestion moyenne (ng/j)], en fin de contamination, et la $\frac{1}{2}$ vie lors de la décontamination ont été calculés pour chaque cas.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

Le gain moyen quotidien simulé était de 1,43 et 0,52 kg/j pour les rations EM+ et EM- respectivement. Pour les deux rations, la proportion de lipides dans le corps vide a évolué de la même façon de 8 à 16 % entre 200 et 600 kg PV. La concentration en contaminant du compartiment muscle dépasse la teneur maximale réglementaire d'un facteur 2,0 pour la ration EM+ et 3,1 pour EM- pour un K_{ow} de 10^5 compromettant ainsi la sécurité sanitaire de la viande. En revanche, la concentration du muscle reste inférieure à la teneur maximale réglementaire pour un K_{ow} de 10^9 (Figure 2). En effet, une forte lipophilie réduit l'absorption du contaminant et son transfert vers l'organisme (McLachlan, 1994). Le BTF augmente de 2,3 pour EM+ à 4,8 pour EM- pour un K_{ow} de 10^5 ; une gamme fidèle aux BTF expérimentaux des PCB persistants (Driesen *et al.*, 2019). Lors de la décontamination, la $\frac{1}{2}$ vie d'un contaminant de $K_{ow} 10^5$ est plus courte pour EM+ (140 j) que pour EM- (281 j).

CONCLUSION

Ces résultats suggèrent des effets importants de l'intensité de croissance sur les paramètres de transfert et de décontamination de contaminants lipophiles aux propriétés variables. Le développement de ce modèle mécaniste se poursuit actuellement afin d'explorer l'interaction complexe entre les propriétés du contaminant et la physiologie animale. Une fois ses capacités prédictives évaluées en comparaison d'observations biologiques, ce modèle pourra être mis à profit afin d'identifier et prévenir les situations à risque et d'anticiper les cinétiques de décontamination en cas d'expositions accidentelles aux contaminants lipophiles et ainsi améliorer la sécurité sanitaire de la viande et des produits carnés.

BVL, 2016. Report 12.4, 62-65. <https://www.bvl.bund.de/>

Driesen C. *et al.*, 2019. Orga. Comp., 81, 128-131

Hoch, T., Agabriel, J., 2004. Agri. Syst., 81, 1-15

INRA, 2018. Wageningen Academic Publisher, Wageningen, 640 pp

Lerch, S. *et al.*, 2018. 3R, 24, 425

McLachlan, MS., 1994. Environ. Sci. Technol., 28, 2407-2414

Zenegg, M., 2018. Chimia, 72, 690-69

1

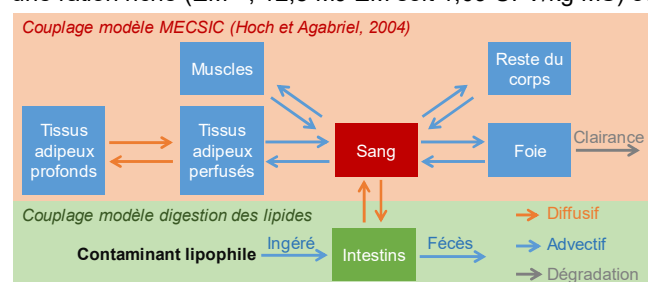


Figure 1 : Modèle mécaniste du transfert des contaminants lipophiles chez le bovin en croissance et son couplage aux modèles de digestion des lipides et de croissance (MECSIC)

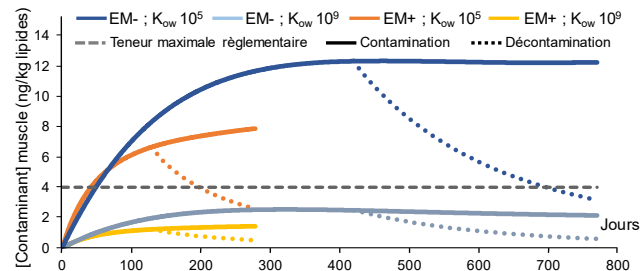


Figure 2 : Cinétiques des concentrations de contaminants faiblement métabolisés en fonction de leur lipophilie (K_{ow}) pour une ration riche (EM+) ou pauvre (EM-) en énergie de 200 à 600 kg de poids vif

