



Réserve Naturelle
NOURAGUES



Rapport du projet d'Observatoire de la Résilience des Impacts de l'Orpaillage aux Nouragues (ORION)

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| I. Résumé | 3 |
| II. Préambule | 4 |
| III. Introduction | 5 |
| 3.1 La Réserve naturelle des Nouragues | 5 |
| 3.2 Le réseau hydrographique de la Réserve | 8 |
| 3.3 Historique de l’orpaillage dans le secteur Nouragues | 9 |
| 3.4 Pression de l’orpaillage contemporain sur la Réserve | 10 |
| 3.5 Impacts de l’orpaillage aux Nouragues | 13 |
| 3.6 Importance de la lutte contre l’orpaillage illégal (LCOI) pour mener le projet ORION | 18 |
| IV. Genèse et enjeux du projet ORION | 20 |
| 4.1 Enjeux de connaissance pour la Réserve | 20 |
| 4.2 Questionnement scientifique du projet ORION | 20 |
| 4.3 Etat de l’art des connaissances sur les impacts de l’orpaillage sur l’environnement | 21 |
| 4.4 Démarche globale et mise en œuvre du projet ORION | 24 |
| V. Matériels et méthodes | 26 |
| 5.1 Axe biotique | 26 |
| 5.2 Axe abiotique | 35 |
| 5.3 Axe écotoxicologie | 36 |
| VI. Résultats | 37 |
| 6.1 Axe Aquatique | 37 |
| 6.2 Axe terrestre | 48 |
| VII. Conclusions et perspectives | 53 |
| VIII. Bibliographie | 62 |
| IX. Annexes | 64 |

I. Résumé

Le projet ORION a été pensé puis porté par la Réserve naturelle des Nouragues pour d'une part réaliser un état des lieux des impacts environnementaux de l'orpaillage illégal dans la Réserve, et d'autre part tenter d'envisager des protocoles au long terme de suivi de résilience du milieu et des espèces associées.

Sa mise en œuvre, financée par France Relance de 2021 à 2023, a permis d'obtenir un inventaire des poissons par ADN environnemental à une grande échelle spatiale, sur 23 sites différents, dans le Nord-Est de la Réserve naturelle des Nouragues. Ce secteur a été fortement travaillé par l'orpaillage illégal depuis les années 2000.

Au niveau des têtes de la crique Mazin (cœur de Réserve, sur un secteur dit « DZ ORION ») un inventaire botanique, des invertébrés aquatiques et des poissons par pêche électrique a été réalisé sur 4 stations, couplé avec une étude de la physicochimie de l'eau.

L'étude de l'ensemble de ces données montre une certaine résilience des communautés aquatiques des têtes de bassin lorsque le couvert forestier est maintenu et que la période d'exploitation illégale reste faible. En effet, l'activité illégale sur le secteur dit ORION aurait commencé fin 2019 et a été stoppée en septembre 2021 grâce à une nouvelle stratégie de lutte contre l'orpaillage illégal (LCOI).

En revanche, des chercheurs qui ont étudié en parallèle l'écotoxicologie des caïmans sur le secteur ORION montrent que leur taux de contamination au mercure reste élevé et impacte la santé des caïmans.

A partir de l'étude des données ADN environnemental, on constate que lorsque les impacts sont plus conséquents sur les têtes de bassin (déforestation, lit mineur très impacté), on observe des modifications en termes de composition fonctionnelle des poissons.

Les inventaires flore n'ont pas permis de dégager des tendances sur les impacts. En revanche l'exploitation de données LiDAR a permis de montrer une altération des ripisylves (notamment au niveau de leur hauteur) lorsqu'il y'a eu une exploitation illégale.

L'ensemble de cette étude a porté sur des impacts sur des petites masses d'eau qui subissent assez peu d'impact provenant des pollutions en amont et dont les surfaces travaillées sont bien plus faibles qu'en aval.

Il serait intéressant à l'avenir de réaliser la même étude sur des secteurs plus en aval pour mieux comprendre les facteurs d'influence anthropiques qui influent sur les communautés aquatiques.

II. Preamble

Ce rapport scientifique clôture et propose la suite au projet ORION, financé à hauteur de 110 318 € par France Relance, convention n° 2021/DGTM/PEB/017. Le projet a démarré en 2022 et au 30/06/2023, l'opération était finalisée.

L'objectif initial de l'action était de « **Suivre l'état écologique des cours d'eau de la réserve naturelle des Nouragues (RNN) par des méthodes d'inventaires permettant d'établir des indicateurs de suivi en suite du projet Nourag'Obs'Eau (NOE) financé par l'Office de l'Eau de Guyane, et mener la 1ère mission d'inventaire d'état initial (sols, faune-flore forestières) pour le suivi de la résilience des milieux dégradés par l'orpaillage dans la RNN (Observatoire Résilience Impacts Orpaillage Nouragues).** »

Pour le projet ORION, l'indicateur de réalisation de l'action est :

- Le taux de consommation des fonds

Le livrable prévu en fin d'action est :

- Les inventaires réalisés sur tous les sites prévus
- La liste d'indicateurs d'état écologique des cours d'eau

L'action était initialement décrite comme faisant suite au projet NOE qui devait déployer quatre stations d'inventaires et de suivis de la qualité des eaux sur la Haute Comté (Brodel, Blanc, Mazin, Comté) et souhaitait suivre deux stations (Japigny et Sable) complémentaires de celle de Pararé (actuel site suivi par la Directive Cadre Eau -DCE) sur la rivière Arataye. **Il s'est avéré qu'avant de mettre en place des stations de suivi pérenne, il fallait déjà pouvoir réaliser des inventaires, choisir et calibrer les bons protocoles pour obtenir des indicateurs pertinents, et qu'il faut bien formuler les objectifs de suivis, surtout dans des secteurs impactés par l'orpaillage, sans données de référence pour l'état initial.** En somme les objectifs de NOE étaient déjà bien ambitieux, et nous avons constaté que ceux d'ORION l'étaient également.

Le travail réalisé dans le cadre du projet ORION (nommé NOE-ORION dans la convention financière) a été conséquent et apporte d'importantes informations dans la dynamique d'inventaire et de calibrage d'indicateurs. **Le travail va devoir être continué et déployé sur le temps long avec l'appui d'experts et de la recherche scientifique si nous souhaitons être pertinent.**

III. Introduction

3.1 La Réserve naturelle des Nouragues

Créée en 1995, la réserve naturelle des Nouragues est située au cœur de la Guyane française, sur la commune de Régina-Kaw (parties centrale et méridionale ; bassin versant de l'Approuague) et sur la commune de Roura (partie Nord ; bassin versant de la Comté). Elle est cogérée depuis décembre 2014 par le Groupe d'Etude et de Protection des Oiseaux en Guyane (GEPOG) et par l'Office National des Forêts (ONF).

Plus grande réserve naturelle terrestre de France par sa superficie, elle protège 105 800 hectares de forêt au sein desquels se trouvent une zone dédiée à la recherche scientifique et une zone dédiée à l'accueil du public.

La stratégie de gestion de la Réserve suit le plan de gestion 2017-2022, acté par arrêté préfectoral n° RAA - R03-2018-02-19-003. Il s'en dégage trois grands enjeux de conservation sont identifiés :

- le bloc forestier et sa mosaïque d'habitats associée (forêts de montagne, de plateaux et de marécage boisé)
- la savane-roche, qui est un faciès particulier d'habitat forestier
- le réseau hydrographique

Maintenir l'intégrité des forêts et la qualité des eaux de la Réserve représente un défi d'ampleur. Les principales menaces restent la déforestation et la pollution des sols et des eaux, engendrées par l'activité de l'orpaillage illégal, en recrudescence sur la Réserve depuis 2016 puis stoppée en 2022.



Figure 1: Localisation de la RN des Nouragues en Guyane française

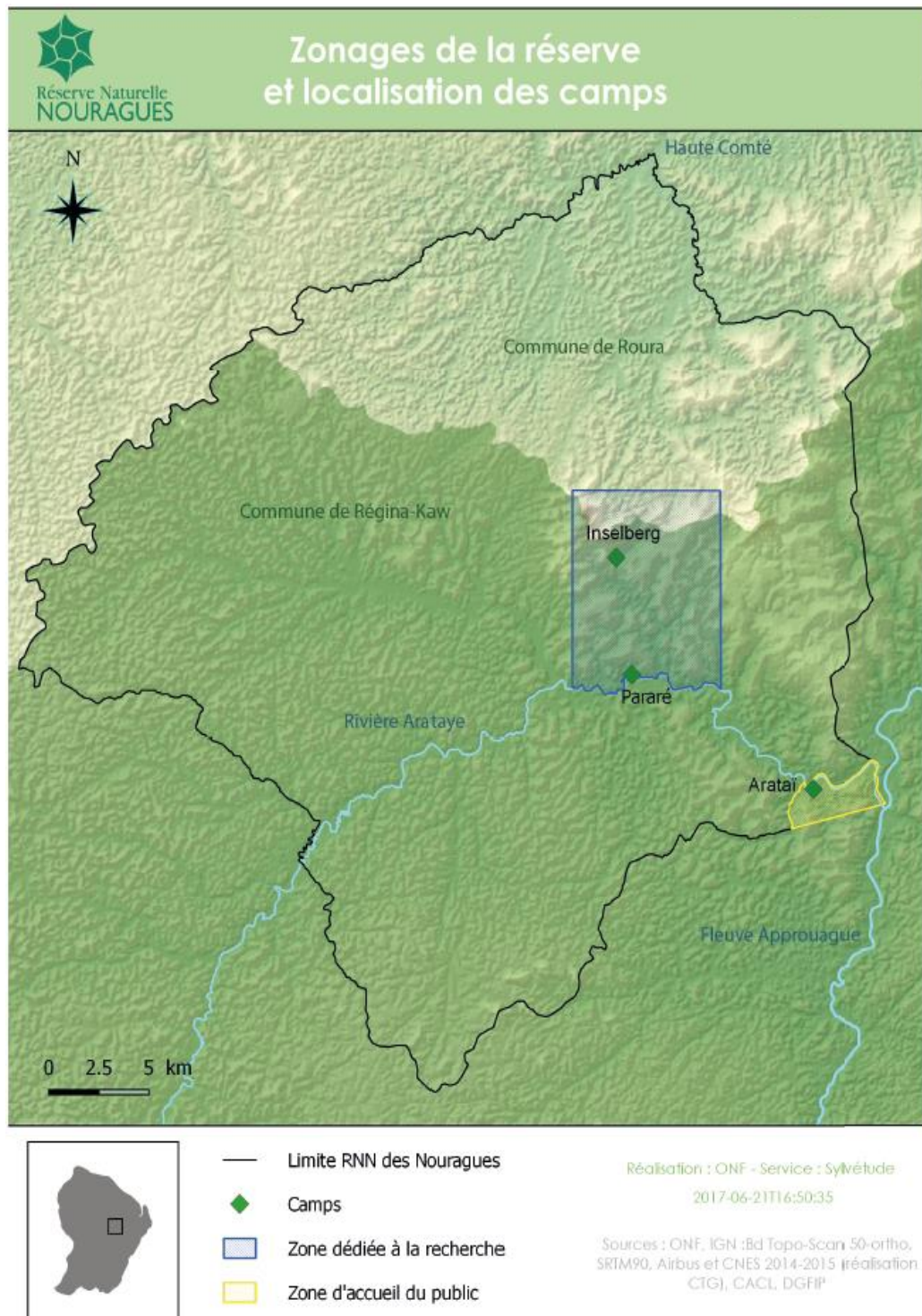


Figure 2: Zonage et localisations des campements "site de vie" des Nouragues

3.2 Le réseau hydrographique de la Réserve

La Réserve est principalement couverte par de la forêt mature et présente des zones de relief allant jusqu'à 478 m sur toute sa partie Est. Elle est reliée au bassin versant de la Comté sur sa partie Nord et de l'Approuague sur sa partie Sud. Elle est l'une des seules Réserves à posséder des sauts sur son réseau hydrographique.



Figure 3: Topographie et réseau hydrographique des Nouragues

La rivière Arataye a été classée en ZNIEFF (Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique) de type I et sert d'état de référence dans le cadre du dispositif DCE (Dispositif Cadre Eau), avec une station présente en niveau du camp Pararé.

La Réserve présente de nombreux enjeux de conservation notamment liés à son réseau hydrologique avec :

- La Loutre géante (EN)
- La Podocnémide de Cayenne (VU)
- L'Onoré fascié (VU)
- L'Hoazin huppé. (EN)
- *Corydoras cf. brevirostris* (EN)

On peut également noter la présence d'*Anomaloglossus blanci* (EN) et plusieurs populations d'*Harttiella longicauda* (VU) sur les cours d'eau de la Réserve et qui font l'objet d'un Plan National d'Action en Guyane.

3.3 Historique de l'orpaillage dans le secteur Nouragues

Les premières pépites d'or de Guyane ont été trouvées sur le haut Approuague, le long des rivières Arataye et Aïkoupai en 1854, par Joseph Paolino. Félix Couy prit Paolino un temps à son service et fonda en 1855 la « Compagnie Agricole et Aurifère de l'Approuague », devenue un peu plus tard « Société des Mines d'Or de la Rivière de l'Arataye ». A partir de 1904, le fleuve Approuague connaît de grandes exploitations aurifères, avec notamment des activités sur le secteur des criques Ipoucin en bordure de l'actuelle Réserve, Mazin et Blanc, la Rivière Arataye et sur la crique Japigny. Entre 1910 et 1930 l'administration estimait qu'il y avait environ 10 000 orpailleurs installés en Guyane Française (plus de 6000 dès 1894). Pierre-Charles Dominique (à l'initiative de la création de la Station CNRS et de la Réserve) indique dans ses mémoires que « le cours de l'Arataye est encombré par quelques bancs de graviers laissés par une barge qui opéra au début des années 1980. Son exploitant m'a dit y avoir extrait 30 kg d'or. Toute la bordure Est de la Réserve des Nouragues, qui chevauche des terrains aurifères, est réputée, localement, comme recelant les plus belles pépites de Guyane. »

On constate que la quasi-globalité des sites concernés par l'orpaillage illégal contemporain faisaient déjà l'objet de demande de concessions aurifères au début du XXème siècle.

En consultant les archives départementales, nous avons pu constater que de nombreux documents existent concernant des demandes de placer sur ces secteurs. Un vrai travail d'archive sera nécessaire dans un futur proche pour récolter l'ensemble des informations de ces documents et établir une cartographie de l'emplacement de ces placers.

Lors de nos missions en itinérance liées au projet ORION, nous avons d'ailleurs pu constater la présence de vieilles bouteilles en verre et de vieilles exploitations aurifères sur la crique Mazin, témoins de l'attractivité de la région même dans les secteurs les plus reculés du secteur Arataye/haute-Comté.

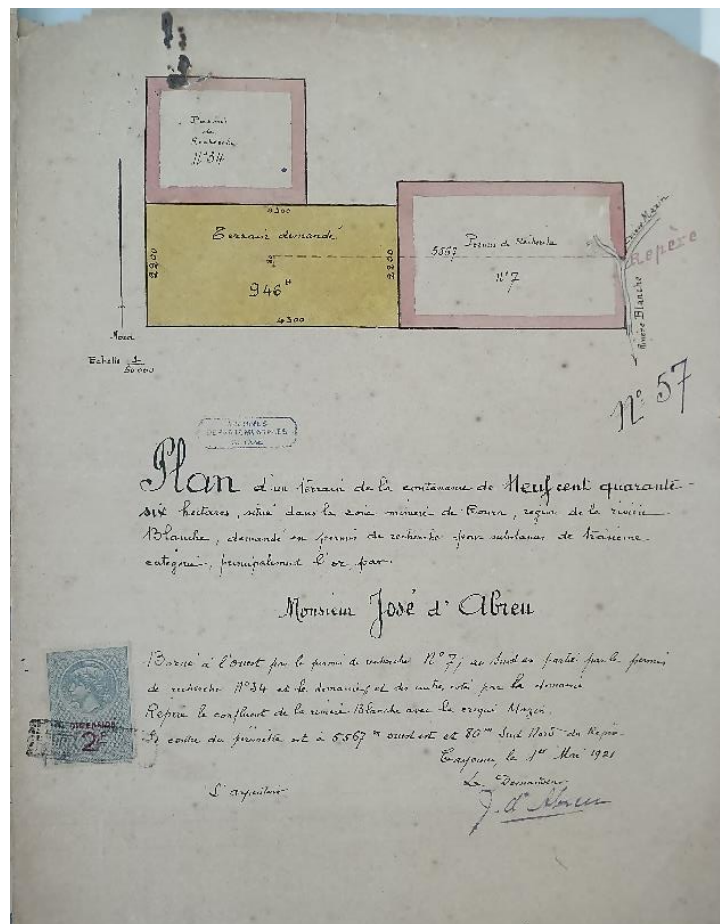


Figure 4: Archive de demande de placer sur la rivière Blanc en 1921

3.4 Pression de l'orpaillage contemporain sur la Réserve

La réserve naturelle des Nouragues est touchée depuis 1997 par l'orpaillage illégal. En 2002, les premiers survols de renseignements menés par l'ONF comptabilisaient déjà 6 chantiers illégaux cumulés sur l'année. En 2004, la situation était au plus critique avec un cumul de 23 chantiers actifs sur l'année au sein de la Réserve, jusqu'à aboutir au double meurtre en mai 2006, sur le camp Arataï, des agents de la Réserve, Andoe Saakie dit Capi, et Domingos Ribamar.

La situation de l'orpaillage illégal en Guyane fluctue en fonction des cours mondiaux de l'or et du carburant, de la situation politique et diplomatique avec les pays voisins et du niveau d'insécurité régionale. Il en va de même au sein de la Réserve des Nouragues, avec une pression forte sur toute la zone Nord-Est de la Réserve jusqu'à sa partie Sud (secteur Japigny). L'activité illégale aux Nouragues et sur l'Approuague ainsi que sur le secteur Bélizon/Jalbot/Cariacou est également régit par les actions mises en œuvre par la lutte contre l'orpaillage illégal (LCOI). Les dispositifs stratégiques exercent une influence directe sur le niveau de l'activité.

Le paramètre des flux logistiques est crucial à prendre en compte dans la compréhension de l'activité d'orpaillage sur le secteur.

Aux Nouragues, le réseau de pistes et layons illégaux créé par les clandestins est considérable. La couverture LIDAR financée aussi par France Relance a récemment dévoilé un réseau bien plus important qu'initialement connu. Ces pistes et layons sont réalisés en continuité de ceux présents en bordure directe de la Réserve, émanant des activités d'exploitation forestière et minière sur les secteurs Bélizon (Nord Réserve) et Jalbot/Cariacou/Ipoucin/Benoît (Nord-Est Réserve).



Figure 5: Cartographie cumulative de tous les chantiers clandestins actifs détectés par voie aérienne depuis les années 2002 à 2022.

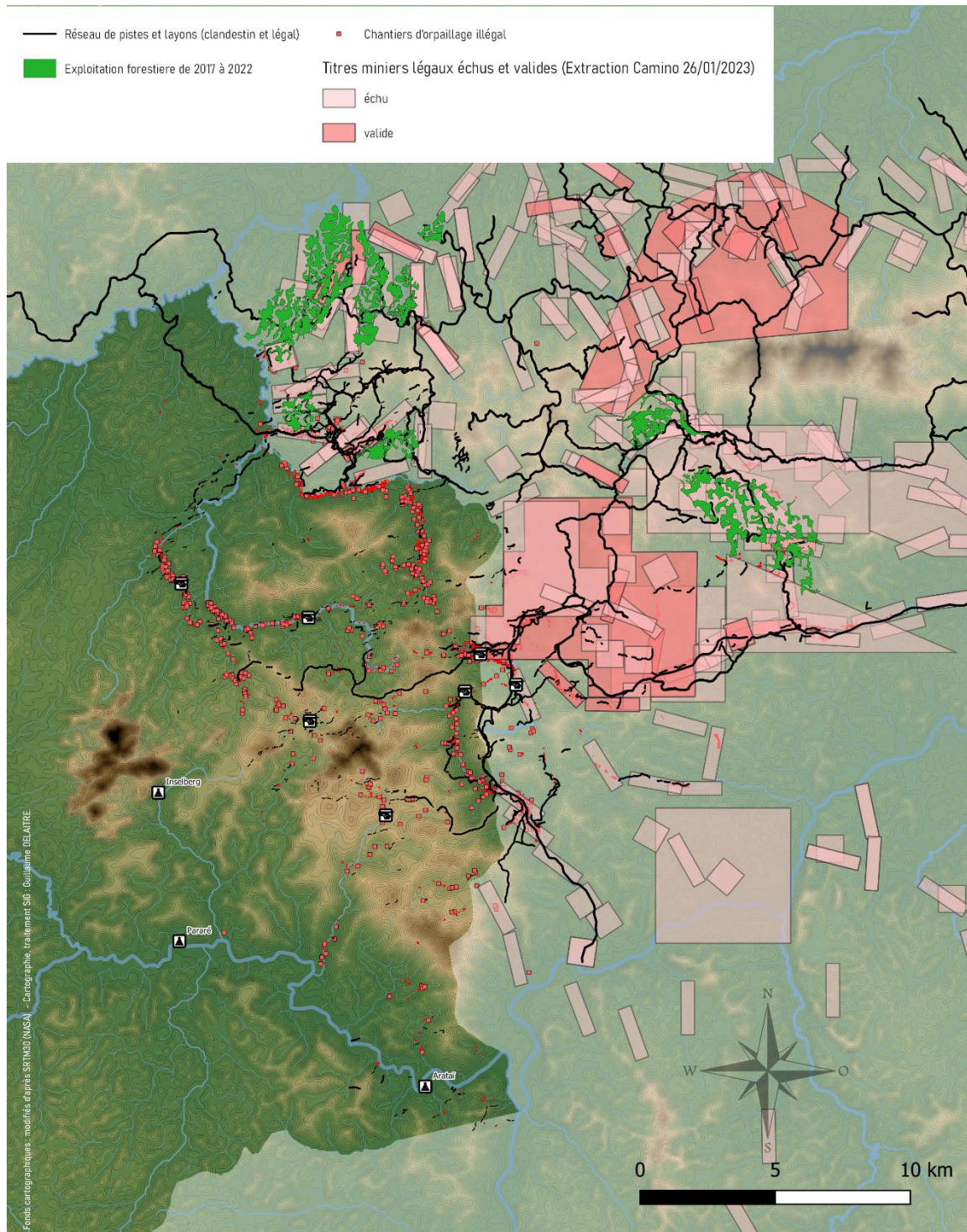


Figure 6: Cartographie des pressions anthropiques au sein et aux abords de la RNN

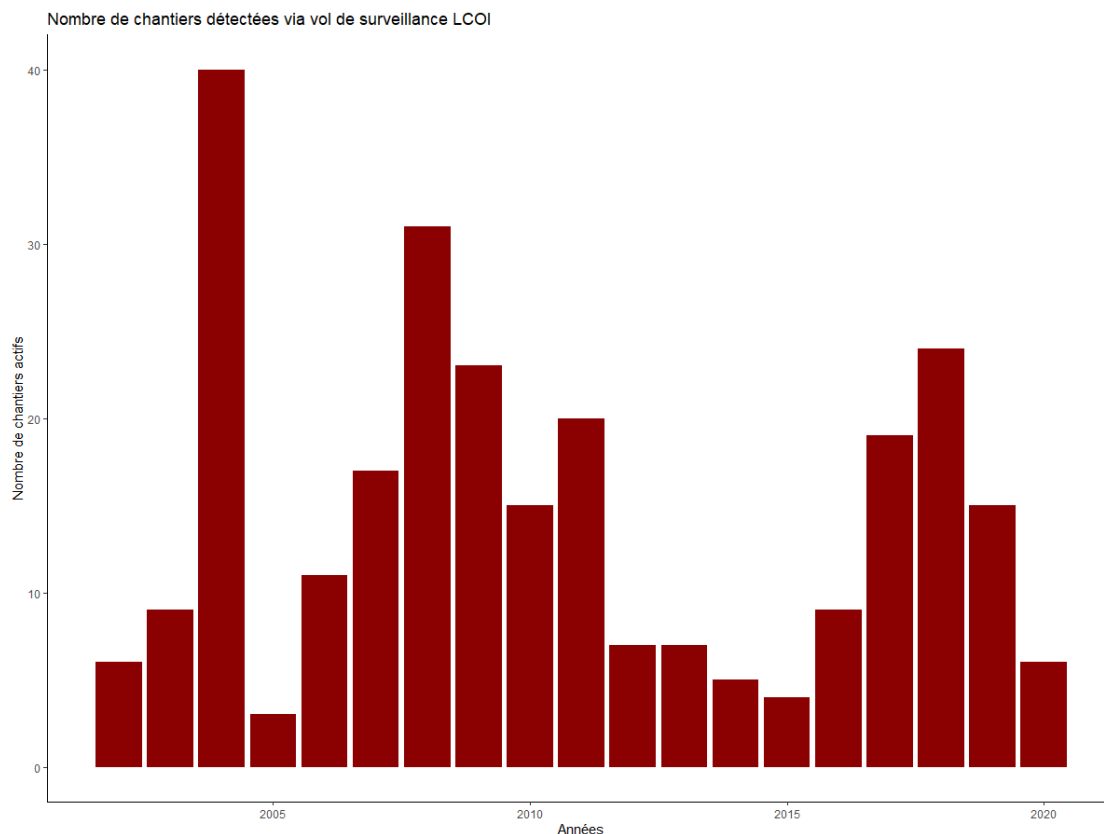


Figure 7 : Fluctuation du nombre de chantiers d'orpaillage illégaux actifs cumulés sur une année, détectés via les survols de renseignements effectués par l'ONF depuis les années 2000. Le nombre de chantiers par année reste néanmoins à être interpréter avec précautions, l'effort de surveillance a beaucoup varié selon les années.

3.5 Impacts de l'orpaillage aux Nouragues

Les impacts de l'orpaillage en Guyane sont multiples et en grande partie visuellement importants : déforestation, destruction et pollution des sols et des cours d'eau, déchets (piles, aérosols, plastiques...), braconnage, pollution au mercure et aux hydrocarbures (essence, huiles de moteurs) ...

Les impacts à grande échelle sont suivis et renseignés depuis 1990 par plusieurs entités notamment l'ONF, le Parc amazonien de Guyane, WWF... L'Office français de la biodiversité (OFB) en fait une synthèse dans son ouvrage « Histoire et impacts environnementaux de l'Orpaillage en Guyane, clefs de compréhension des tensions actuelles » (Melun G., Le Bihan M., 2020).

Il y est indiqué que « sur le réseau hydrographique les dégradations physico-chimiques (température, matière en suspension, oxygène dissous) sont importantes et se diffusent longitudinalement vers l'aval, bien au-delà des marges de la zone exploitée suivant l'axe fluvial. D'importants linéaires subissent ainsi indirectement les répercussions de l'activité en recevant les polluants issus de l'orpaillage ». Aux Nouragues, cela s'illustre avec la rivière Blanc-Mazin, turbide sur tout son linéaire jusqu'à se déverser sur la Haute Comté, en confluence avec la rivière Brodel, non impactée.



Figure 8 : Pointe Nord de la Réserve des Nouragues, à gauche la rivière Brodel intacte, à droite la rivière Blanc-Mazin turbide, 2017 © B. Gissinger



Figure 9 : Canaux de dérivation réalisés par les orpailleurs clandestins aux Nouragues, secteur Mazin



Figure 10 : Tête de la crique Nouragues, impactée par l'orpaillage illégal en 2021. Zone de chantier avec barrage en feuilles pour diminuer la visibilité de la pollution aquatique © A. David

L'activité d'orpaillage illégal libère de grandes quantités de boue alluvionnaire dans le cours d'eau. Cela induit une hausse de matières en suspension dans le cours d'eau entraînant ainsi une hausse de la turbidité. Vis-à-vis de la biodiversité, cette turbidité peut modifier la physicochimie du cours d'eau et avoir une incidence sur l'interaction entre espèces/individus (sur leurs comportements sociaux ou sur les relations proies-prédateurs). Une forte hausse de la turbidité a également un effet abrasif sur le système respiratoire des poissons, pouvant mener jusqu'à une forte hausse de mortalité. Les impacts sur la biodiversité vont dépendre de la quantité de matière en suspension mais également surtout la durée d'exposition avant un retour à la normale.

Sur les zones exploitées, G. Melun et M. Le Bihan mentionnent le fait que « la modification structurelle du réseau hydrographique au droit de la zone exploitée est à l'origine de plusieurs dysfonctionnements. [...] l'altération de la morphologie naturelle du lit des criques réduit fortement la diversité des habitats constitutifs du lit ayant pour conséquence une diminution drastique de la richesse et de la diversité spécifique des biocénoses au sein et à proximité des cours d'eau. »

Les orpailleurs détournent par exemple le cours d'eau à travers des canaux de dérivation pour alimenter leurs machines. Une perte de la sinuosité est alors constatée sur les zones de chantier. Notons en plus que les matières en suspension (MES) ont un fort pouvoir décapant. Leur hausse dans le cours d'eau augmente l'érosion des berges et peut créer une incision du cours d'eau, augmentant d'autant plus la quantité de MES et la vitesse du cours d'eau. Cette spirale contribue à profondément modifier le cours d'eau sur le long terme. La hausse de MES participe en plus au lessivage des fonds en retirant la litière et les petits bois, réduisant la quantité d'abris, ce qui peut altérer les pontes de certaines espèces. Elle favorise également l'homogénéisation du substrat par du colmatage et la formation de couches de dépôts voire de plages de sédiments alluvionnaires entraînant la perte de microhabitats.



Figure 11 : Impact des chantiers illégaux sur les têtes de la crique Mazin, secteur désormais nommé ORION, 2021 © A. David

Aux Nouragues, les photographies réalisées lors des missions de lutte contre l'orpaillage illégal (LCOI) sont éloquentes. Le déploiement des missions pédestres LCOI ont même mis à jour des activités clandestines sur les têtes de la crique Nouragues ; crique jusqu'alors pensée comme intacte et non impactée par l'orpaillage. Cette crique passe au pied du camp Inselberg de la Station scientifique gérée par le CNRS et se jette dans la rivière Arataye, non loin du camp Pararé. La crique Nouragues fait l'objet de projets de recherche comme l'étude des caïmans et la contamination de mercure. Le constat des impacts au niveau de ses sources change le prisme de vision de la lutte contre l'orpaillage mais aussi des résultats et de leurs interprétations de la recherche scientifique !

Ces images (Figures 10 et 11) illustrent la mobilisation de boue, le colmatage, les pollutions aux hydrocarbures (dont l'impact n'est, à notre connaissance, à ce jour non étudié). On voit aussi que les orpailleurs illégaux créent des barrages avec des feuilles de palmiers (ou avec des sacs de riz) pour filtrer les matières en suspension. Ces barrages sont nombreux mais peu durables. Ils peuvent représenter des ruptures de connectivité, qui peuvent freiner la recolonisation des espèces sur certains cours d'eau.

Les impacts sous couvert forestier sont plus importants qu'initialement imaginés (Figures 9-10-11) et s'ajoutent aux secteurs fortement déforestés.

Selon les bilans patrimoniaux de l'ONF, en Guyane, 29 000 ha ont été déforestés entre 2003 et 2019 par l'activité minière (légale et illégale). Il existe à ce jour assez peu d'études sur l'impact de la déforestation sur la faune terrestre. Concernant la faune aquatique, on peut néanmoins citer les travaux de Cantera et al. 2022 et Cantera et al. 2023, qui montrent un déclin assez lourd d'un point de vue fonctionnel sur la faune vertébrée (poissons et mammifères) des secteurs déforestés sur le Maroni et l'Oyapock.

Les petits cours d'eau déforestés n'observent pas de baisse de diversité fonctionnelle en poissons, en revanche, il y a une baisse de la redondance fonctionnelle (Cantera et al. 2023). La baisse de redondance fonctionnelle signifie une diminution d'un nombre d'espèces

capables d'assurer un rôle fonctionnel précis, souvent associé à une perte de résilience de l'environnement. Cette baisse de redondance fonctionnelle peut engendrer des modifications de la dynamique trophique. Les communautés de poissons avec une baisse de redondance fonctionnelle sont souvent plus vulnérables aux impacts. Sur les masses d'eau plus importantes déforestées, on observe une perte des espèces spécialistes et de diversité fonctionnelle.

Sur la Figure 12, on remarque l'importance de la zone de déforestation mais aussi la grandeur de la barranque, bassin lentique qui déconnecte le cours d'eau et au sein duquel le phénomène de méthylation du mercure se déploie. Le méthylmercure est alors bioassimilable et contamine toute la chaîne alimentaire.



Figure 12 : Barranque de chantier clandestin sur les têtes de crique Mazin Ouest



Figure 13 : Vue en 2023, 20 ans après exploitation illégale en 2003-2004, sur 4 kilomètres par un opérateur légal de la Rivière Blanc, frontière de la Réserve des Nouragues ©Alexandre David

L'absence de zone tampon autour de la Réserve conduit à des conflits d'usage, avec de nombreuses exploitations légales en bordure directe de la Réserve, dont certaines ont pollué le réseau hydrographique de la Réserve.

La Réserve a été travaillée illégalement par des opérateurs miniers légaux sur la Rivière Blanc en 2003-2004 (Figure 13 et Figure 14) ainsi que sur la crique Benoit et Ipoussing. Ces secteurs ont été impacté par des méthodes industrielles et n'ont jamais été réhabilités, la reprise végétale n'a toujours pas repris 20 ans après exploitation, les barranques n'ont jamais été déconnectées du réseau hydrographique, la sinuosité du cours d'eau n'a également jamais été remise en état.

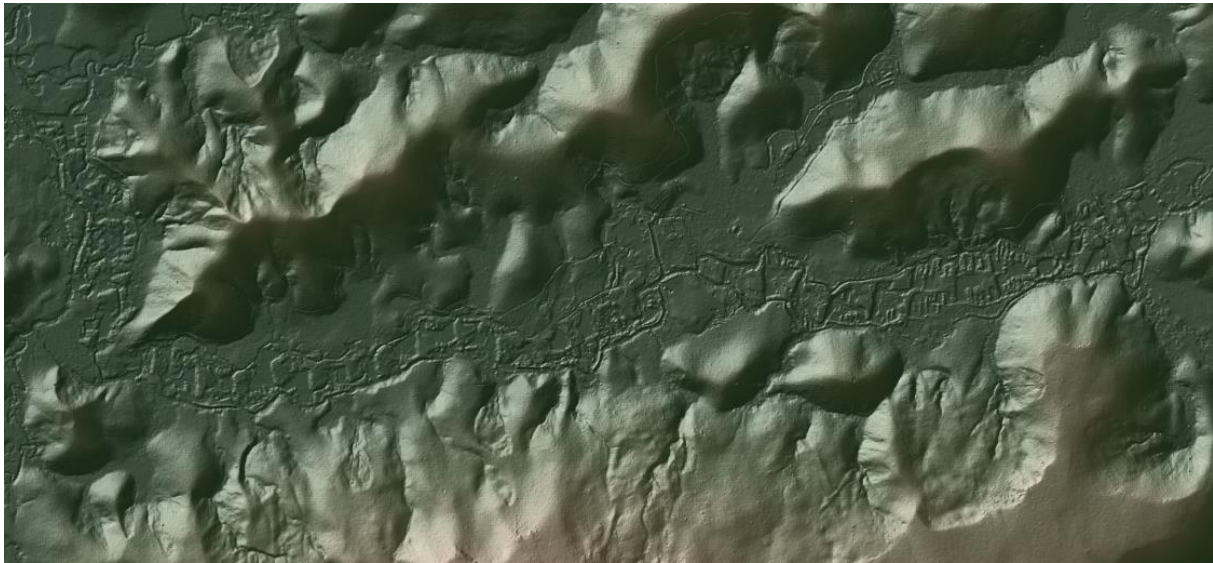


Figure 14 : Modèle Numérique de terrain de la Rivière Blanc, montrant la modification hydrogéomorphologique sur 4 kilomètres au sein de la Réserve opérée illégalement par un opérateur légal (source LiDAR 2022 – France Relance)

3.6 Importance de la lutte contre l'orpaillage illégal (LCOI) pour mener le projet ORION

Les actions répressives et répétées sur le terrain (destruction des chantiers, campements et du matériel) couplées avec la jugulation des flux logistiques (ex : barrage routier sur la piste de Bélizon, barrage fluvial sur l'Approuague) sont efficaces au vu de l'isolement de la Réserve et du coût de l'acheminement du matériel. Cette stratégie d'actions couplées épuise les capacités de résilience de l'activité illégale, à condition que les actions soient maintenues de manière soutenue.

Jusqu'alors les actions LCOI menées aux Nouragues par la gendarmerie et l'armée n'étaient pas suffisamment nombreuses et répétées sur l'année pour être efficaces. De plus, le secteur Nouragues restait moins prioritaire pour les actions LCOI comparé aux bassins de vie tels que Maripasoula ou Camopi. En 2021, l'ONF a bénéficié de nouvelles prérogatives judiciaires pour pouvoir intervenir sur la destruction de matériel d'orpaillage illégal. L'ONF et la Réserve ont alors revu leur rôle pour devenir moteurs dans le pilotage et la réalisation de la LCOI aux Nouragues. Une stratégie d'intervention très régulière (tous les 15 jours/3 semaines) a été proposée par l'ONF puis acceptée par les membres du dispositif Harpie. La mise en œuvre a commencé en septembre 2021, avec le soutien financier des Ministères des Outre-Mer et de l'Environnement (Mission d'Intérêt Général des Outre-mer - MIG-DOM- et BOP 113).

Sur le terrain, la stratégie s'est traduite en une tactique d'approche déployée et pilotée par les agents USN-ONF avec renseignements et/ou destruction du matériel des chantiers clandestins. Les agents ONF ont une fine connaissance cartographique de la zone et de la dynamique de l'activité illégale sur le secteur.



Figure 15 : Chantier clandestin survolé le 30/07/2019 sur tête de crique Mazin Est

Cette stratégie a porté ses fruits jusqu'à l'éradication de l'orpaillage illégal dans la Réserve de septembre 2022 à novembre 2023. La Réserve, appuyée par les financements de l'Etat continue ses efforts pour maintenir ces résultats.

Ces actions LCOI et leur maintien sont cruciales pour le projet ORION à plusieurs titres :

- Nous sommes capables de dater exactement l'arrêt de l'activité illégale sur un secteur d'étude, dans un contexte où nous n'avons aucune donnée d'état initial. Dans la perspective d'étude de résilience, c'est d'un intérêt majeur.
- Pour étudier la résilience, il faut également s'inscrire sur du long terme. Si les actions LCOI ne sont pas maintenues, l'activité illégale reprendra sur les secteurs et les études scientifiques auront été vaines car la dynamique de résilience sera rompue.
- Pérenniser des actions de suivis naturalistes et scientifiques sur les zones dégradées par l'orpaillage nécessite de garantir la sécurité du personnel et des partenaires déployés sur site. Les chercheurs partenaires actuels d'ORION nous ont indiqué que de tels sites impactés par l'orpaillage bénéficiant d'actions

LCOI pérennes qui garantissent la sécurité de la zone étaient, à leur connaissance, uniques au monde et permettaient d'envisager un déploiement de projet de recherche au long terme. L'attractivité scientifique est donc augmentée sur ces sites, ce qui est précieux pour les gestionnaires d'espace protégé, vu le manque de connaissance et donc la nécessité de renfort de la recherche scientifique sur nos questionnements de gestionnaires.

Le projet ORION bénéficie donc de la LCOI sur le secteur, et n'a pu être mis en œuvre que grâce aux actions de LCOI réalisées de manière concomitante. Par ailleurs, le projet fait lui aussi partie de la stratégie LCOI de la Réserve en intégrant la phase V de la stratégie dont l'objectif est d'occuper le terrain de manière régulière.

IV. Genèse et enjeux du projet ORION

4.1 Enjeux de connaissance pour la Réserve

Comme vu précédemment dans ce rapport, l'orpaillage a été pratiqué au sein des Nouragues depuis plus de 100 ans. Les études scientifiques sur les impacts de cette activité restent à ce jour encore trop peu nombreuses. Jusqu'à il y'a peu, les secteurs orpaillés des Nouragues n'avaient jamais été prospectés par des agents de la Réserve ou des experts naturalistes. Nous n'avions donc aucun aperçu de l'état écologique de la forêt et des cours d'eau de ces secteurs, et encore moins la connaissance de ce qui était présent avant les impacts pour avoir un état zéro de comparaison. La liste des poissons présents sur les têtes du bassin versant de la Comté était inconnue avant 2020.

Ainsi la Réserve a lancé dans un premier temps le projet Nouragues Obs'Eau (NOE) avec une mise en œuvre en 2020-2021 pour étudier l'état écologique des cours d'eau et tester des indicateurs d'état ailleurs que sur l'Arataye. Un protocole de type DCE a alors été appliqué par le bureau d'études Hydréco sur 4 sites (Mazin, Mazin-Blanc, Brodel et Haute-Comté). La forte turbidité et la grosse quantité de dépôt a empêché d'exploiter l'indice mercure, poissons et diatomées sur les sites impactés.

L'analyse DCE rapporte un mauvais état écologique de la crique Mazin, un état bon à médiocre de la rivière Blanc et un état plutôt bon de la Comté (bénéficiant d'un facteur dilution via la rivière Brodel). Seule la crique Brodel est en très bon état écologique.

Afin d'améliorer l'inventaire poisson, un inventaire par méthode ADNe a été réalisé sur 10 criques proches des 4 secteurs DCE. Ce complément d'inventaire par méthode ADNe a permis d'augmenter de 7% la liste des poissons connus des Nouragues et de 20% la liste des poissons à fort enjeu.

Malheureusement, le protocole d'échantillonnage n'était pas bien calibré pour obtenir des résultats pertinents. La variation en termes de tailles de crique et de sous-bassins versants entre les sites n'ont pas permis de distinguer statistiquement des tendances issues de l'orpaillage ou de différences environnementales.

Afin d'aller plus loin dans l'étude de ces masses d'eau, la Réserve a écrit le projet ORION avec pour ambition de mener une étude pluridisciplinaire sur des sites impactés par l'orpaillage illégal.

4.2 Questionnement scientifique du projet ORION

Les deux objectifs scientifiques globaux sont de :

- 1) Définir l'état écologique des milieux aquatiques et forestiers en secteur orpaillé, en réalisant dans un premier temps des inventaires d'état t0
- 2) Trouver les meilleurs protocoles et indicateurs pour suivre l'évolution des habitats et des populations faune-flore associées et mesurer la résilience des écosystèmes suite à l'orpaillage illégal

Les objectifs pratiques qui en découlent pour les gestionnaires de la Réserve sont de :

A. Etablir des protocoles de suivi de l'état écologique des cours d'eau qui soient soutenables sur la dotation financière de la Réserve et qui puissent aider au long terme à la prise de décision d'actions de gestion

B. Envisager des projets de plus grande ampleur avec la recherche scientifique pour répondre à des sujets écologiques de fond tel que l'impact du mercure sur l'écologie des espèces, la résilience hydromorphologique des cours d'eau...

Ces objectifs sont complexes à atteindre et vont nécessiter la mobilisation d'experts et de chercheurs au long terme pour aider aux prises de décision de gestion de la Réserve.

A l'origine, le projet ORION a été pensé pour étudier les axes suivants :

I. Vivant (axe biotique), en étudiant :

- 1) **Les communautés de poissons** (par les méthodes d'inventaires classiques et méthodes ADNe)
- 2) **Les macro-invertébrés**
- 3) **Les diatomées**
- 4) **La faune terrestre** (en testant des méthodes acoustiques via les Audiomoths et pièges photos)
- 5) **La botanique** en ripisylve

II. Non vivant (axe abiotique), en affinant :

- 6) **La cartographie et la caractérisation des habitats (hydrogéomorphologie) et des impacts** (interaction chantier-linéaire de cours d'eau), notamment avec les méthodes LIDAR terrestre et aérien
- 7) **La physico-chimie** pour le suivi de la qualité de l'eau
- 8) **La géologie**

III. Ecotoxicologie, notamment sur l'étude de la bioaccumulation de mercure. Pour le moment, ce sujet est traité par les chercheurs Jérémy Lemaire et Rosanna Mangione de l'Université de Vienne qui étudient :

- 9) **L'écotoxicologie** sur les caïmans

4.3 Etat de l'art des connaissances sur les impacts de l'orpaillage sur l'environnement

Déforestation :

L'activité minière légale et illégale aurait, d'après l'ONF, engendré une déforestation de 29000 ha de forêt en Guyane entre 2003 et 2019. Il existe à ce jour assez peu d'études traitant de l'impact de la déforestation sur la faune. On peut néanmoins citer les travaux de Cantera et al. 2022, qui montrent un déclin assez lourd sur la faune vertébrée (poissons et mammifères) des secteurs déforestés sur le Maroni et l'Oyapock.

Contamination aux métaux lourds :

Les activités alluvionnaires d'extraction aurifère libèrent les métaux lourds (Mercure, Antimoine, Plomb, Chrome, Nickel, Zinc, Baryum...) contenus naturellement dans le sol qui vont se déverser dans le linéaire de cours d'eau en aval de l'exploitation.

Concernant le mercure, sa forme méthylée, la forme la plus toxique pour le vivant, est favorisée par la création de milieux lenticques comme les barranques.

L'effet de ces métaux lourds reste encore assez mal connu sur l'environnement en Guyane. La littérature scientifique des autres régions du monde montre qu'avec des doses infimes de métaux lourds, les poissons présentent des lésions sur leurs organes (notamment le cerveau, le foie et les reins), des augmentations du nombre de cellules cancéreuses (Olsson et al. 1998 ; Beyersmann et al. 2008), une perturbation de certains cycles hormonaux, une diminution du taux d'hémoglobine et du système immunitaire.

Ces métaux lourds se retrouvent accumulés au sein de la chaîne trophique chez les top-prédateurs comme les hérons, les caïmans, les loutres, les aïmaras... (Régine et al. 2006).

Cette accumulation se retrouve ensuite chez l'Homme, notamment chez ceux qui consomment beaucoup de poissons. S'ajoute à cela, pour le cas des chantiers clandestins, une pollution au mercure anthropique lors de l'amalgamation de l'or. Ce mercure anthropique se retrouve dans les cours d'eau, mais également dans l'atmosphère où il est absorbé par les arbres puis dispersé à large échelle pendant l'évapotranspiration des arbres.

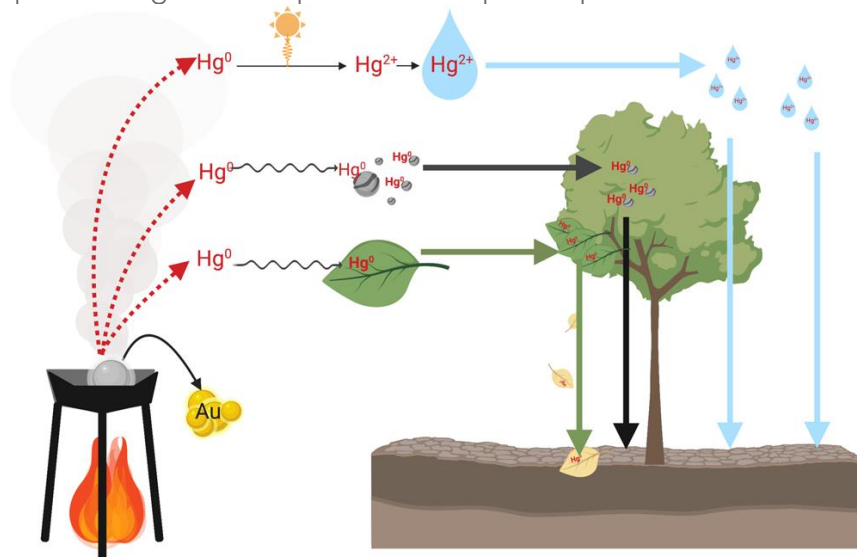


Figure 16 : Cycle du mercure atmosphérique, R.Gerson et al. 2022

R.Gerson et al. 2022 montrent que les oiseaux myrmécophages au Pérou se nourrissant de fourmis mangeant des feuilles de litière ou de canopée ayant absorbé du mercure atmosphérique liés à des activités d'orpaillage illégal, ont jusqu'à 30% de perte de pouvoir reproducteur.

Lemaire et al. 2021 montrent que les femelles caïman transmettent leur contamination au mercure à leurs petits, ce qui affecte négativement leur taille à la naissance. Le mercure affecte également le fonctionnement de leur foie.

Pollution sonore :

La pollution sonore associée aux bruits de moteurs pourrait affecter le comportement de la faune. Sur le sommet de l'Inselberg des Nouragues, on peut entendre les moteurs des concessions légales sur le secteur Blanc à plus de 13 km. Buyela et al. 2021 semblent montrer que la pollution sonore des moteurs utilisés par les clandestins se situe entre 80 et 110 dB.

Il existe encore à ce jour trop peu de littérature scientifique à ce sujet pour évaluer l'impact et connaître les espèces les plus vulnérables aux bruits anthropiques. On sait néanmoins que cela peut engendrer du stress chez les animaux et que certains d'entre eux, notamment les oiseaux, modifient leur fréquence acoustique pour tenter de communiquer malgré le bruit des moteurs (Gomes et al. 2022).

La chasse :

La présence d'orpailleurs illégaux est parfois aussi associée à des pressions de chasse. A ce jour, aucune étude n'a pu être mise en œuvre pour évaluer les impacts de la chasse issue de l'orpaillage illégal sur la faune. Selon les chantiers, les pratiques de chasse vont être très variables selon la taille des campements, mais aussi les contraintes d'accès. Sur les secteurs qui contiennent le plus de campements, il n'est pas rare d'observer des constructions servant d'affuts et qu'il y ait des personnes dont la mission est exclusivement dédiée à la chasse. Sur des chantiers à plus petite échelle, on va davantage observer de la chasse opportuniste.

Nous avons pu constater, lors de nos missions ORION, des affuts de chasse ainsi que des cartouches, témoins d'une activité de chasse sur le secteur Mazin.

La pollution aquatique :

Les sites de vie des zones clandestines font l'objet de pollution d'hydrocarbures (essence, huiles de moteur...). L'impact de ces hydrocarbures sur la santé des organismes aquatiques de Guyane n'a pas encore été étudié.

L'activité d'orpaillage illégal libère de grandes quantités de boue alluvionnaire dans le cours d'eau. Cela induit une hausse de matières en suspension dans le cours d'eau entraînant ainsi une hausse de la turbidité. Cette turbidité peut modifier la physicochimie du cours d'eau, avoir une incidence sur l'interaction entre espèces/individus (sur leurs comportements sociaux ou sur les relations proies-prédateurs (Fitzgibbon et al. 2020, Van de Meutter et al. 2005)). Une forte hausse de la turbidité va également avoir un effet abrasif sur le système respiratoire des poissons (Cavanagh et al. 2014), pouvant mener jusqu'à une forte hausse de mortalité. Les impacts sur la biodiversité vont dépendre de la quantité de matière en suspension mais également surtout de la durée d'exposition avant un retour à la normale.

La modification de l'hydrogéomorphologie du cours d'eau :

Au niveau du chantier, de profondes modifications hydrogéomorphologiques peuvent avoir lieu. La création de barranques crée de nouvelles zones de milieux lenticques. Les orpailleurs détournent également souvent le cours d'eau à travers des canaux de dérivation pour alimenter leurs machines. On a en général une perte de la sinuosité sur les zones de chantier. Pour ne pas être détectés, les orpailleurs illégaux créent des barrages avec des feuilles de palmiers et/ou avec des sacs de riz pour filtrer les matières en suspension. Ces barrages sont nombreux mais peu durables. Ces barrages peuvent représenter des ruptures de connectivité, qui peuvent freiner la recolonisation des espèces sur certains cours d'eau.

Au-delà des impacts locaux, on peut retrouver des traces de l'orpaillage très loin en aval des chantiers. La hausse en matière en suspension a un fort pouvoir abrasif, ce qui augmente fortement l'érosion des berges et peut induire à une incision du cours d'eau (Scheingross et al. 2014, Lague et al. 2014). Cette érosion et incision peut augmenter la quantité de matière en suspension et augmenter la vitesse du cours d'eau, ce qui va contribuer à une spirale qui va profondément modifier le cours d'eau sur le long terme.

La hausse de matières en suspension va également contribuer au lessivage du cours d'eau en retirant la litière et petit bois, réduisant la quantité d'abris et pouvant altérer les pontes de certaines espèces. Elle va également induire à une homogénéisation du substrat avec le colmatage, la formation de couches de dépôts voir de plages de sédiments alluvionnaires entraînant la perte de microhabitats.

Impacts sur la diversité :

Sur une étude réalisée sur 6 cours de petites tailles sur la Réserve des Nouragues (Brosse et al. 2011), la richesse en termes d'espèces de poissons n'est pas affectée par le fait qu'il y ait une présence d'orpaillage ou non. En revanche, cette étude montre que l'on a une perte de diversité fonctionnelle sur les cours d'eau qui ont déjà eu un impact de l'orpaillage illégal même ancien avec une prédominance d'espèces ubiquistes de petites tailles. L'absence de retour à la normale de la diversité fonctionnelle des années après exploitation semble indiquer une faible résilience des espèces spécialistes des petits cours d'eau aux pressions d'orpaillage. Ces conclusions se retrouvent également dans les travaux de Allard et al. 2016.

Cantera et al. 2022 a montré récemment que les impacts de l'orpaillage sur les cours d'eau se font sur une large échelle et que l'on peut retrouver une perte de richesse fonctionnelle et taxonomique jusqu'à 30 km des secteurs impactés par l'orpaillage illégal.

4.4 Démarche globale et mise en œuvre du projet ORION

A l'origine du projet ORION, il était prévu de faire une étude comparative pluridisciplinaire entre les secteurs impactés (criques Mazin, Blanc) et non impactés (criques La Folie et Blanche). Cependant, les criques La Folie et Blanche ont finalement été écartées car elles comportaient beaucoup trop de différences pour pouvoir servir de référence (différence de topologie vis à vis des secteurs impactés et des sous bassins-versants, d'habitats forestiers, de taille de flat...).

Il a donc fallu recentrer les secteurs d'études pour être plus pertinent sur les analyses des données. Il a fallu trouver des secteurs impactés vs non impactés comparables, donc de taille similaire pour bien isoler l'effet « orpaillage » sur les analyses écologiques, être en tête de criques pour discriminer l'effet « affluent » et accessibles à partir de déposes héliportées. Les têtes de criques Mazin-Blanc du bassin versant le plus impacté et les têtes de criques Nouragues répondaient à ces trois prérequis « terrain ». Afin de trouver les meilleurs sites d'étude au long terme et de vérifier sur le terrain si les criques étaient réellement impactées ou pas, deux missions prospectives et itinérantes ont été organisées en novembre et décembre 2022. La trame du projet Nouragues Obs'Eau (NOE) a été reprise pour étudier un maximum de petites masses d'eau comparables dans les secteurs précités, avec le moins de variabilité environnementale possible pour mieux identifier les impacts de l'orpaillage illégal.

En raison du nombre de sites à prospecter et l'incertitude sur le fait que les sites soient impactés ou non pas l'orpaillage, il était impossible de faire des études pluridisciplinaires sur chaque site. Il a alors été décidé d'utiliser la méthode d'inventaire par ADN environnemental (assez robuste avec peu de matériel à transporter) pour, a minima, comparer les communautés de poissons entre les secteurs. Des scans LiDAR terrestres ont également été réalisés pour caractériser l'impact sur les habitats.

Deux missions de 6 jours chacune ont été menées dans ce cadre en 2022, avec 20 têtes de criques prospectées (16 prélèvements ADN sur le bassin versants Comté et 4 sur le bassin versant Approuague et 37 scans LiDAR terrestre). Les missions se sont déroulées en itinérance avec la mobilisation de 6 à 8 agents de l'équipe de la Réserve, avec le soutien des agents de l'USN-ONF. Leur présence lors de ces missions terrestres a permis d'améliorer les connaissances terrain de l'équipe Réserve et a été indispensable pour identifier les secteurs à prospecter au regard des retours d'expérience LCOI. Malheureusement il a été constaté, une fois au sol, qu'il y avait bien plus de chantiers illégaux d'orpaillage que détectés par les airs lors des missions héliportées de surveillance LCOI. Les criques sont donc bien plus impactées qu'initialement pensé. Une couverture LiDAR aéroportée, également financée par France Relance, et acquise fin 2022, a permis également par la suite de confirmer ces impacts non visibles par observation héliportée.

Une fois ces premières missions prospectives menées en 2022, il s'agissait alors de mettre en œuvre l'objectif phare du projet : une mission pluridisciplinaire sur un secteur défini où il y aurait la possibilité d'étudier à la fois une crique impactée par l'orpaillage et une crique non impactée.

Le choix du site a été complexe car l'accès logistique en site isolé était la plus grosse des contraintes pour l'accueil d'une dizaine de personnes (experts, agents RN...). Au regard des missions de 2022 et avec une première analyse du LiDAR aérien, le site de Mazin-Est semblait scientifiquement le plus adapté car la ripisylve ainsi que l'hydrogéomorphologie y a été très fortement impactées et permettaient de faire ressortir facilement un gradient d'impact. Malheureusement, l'établissement d'un camp proche de la DZ Mazin-Est et la logistique de mission s'avéraient trop complexes. Il y avait également un risque que cette DZ soit submergée en cas de crue lors de la date de mission.

Le secteur de la DZ dite « ORION » a finalement été choisi au regard des impacts récents mais bien plus atténués que sur Mazin (absence de déforestation, faible modification de l'hydrogéomorphologie, durée d'exposition aux impacts assez faible...), sans avoir pour autant la visibilité sur le fait qu'il y aurait une tête de crique non impactée à comparer.

Pour acter des thématiques d'étude les plus pertinentes à mener, l'équipe de la Réserve a proposé d'établir un conseil scientifique (CS) spécial ORION pour échanger et acter des choix.

Le Comité Scientifique réuni en date du 07/02/2023 a tranché sur différents axes mentionnés dans la partie 4.2 :

- Concernant le volet écotoxicologique, plusieurs taxons ont été proposés par l'équipe de la Réserve pour suivre la bioaccumulation du mercure (têtards, crevettes, poissons, caïmans). Le CS a décidé de se focaliser sur les caïmans qui sont déjà étudiés par les chercheurs partenaires mais a également proposé d'étudier les chauves-souris qui ont beaucoup été étudiées sur les sites miniers au Pérou.
- Concernant le volet faune terrestre, l'utilisation de capteurs acoustiques pour procéder à un inventaire a été validé
- Concernant le volet biotique aquatique, il a été décidé d'opter sur de la pêche électrique en complément de l'ADN environnemental pour l'inventaire des poissons pour avoir une estimation d'abondance et valider la liste d'espèce par ADN environnemental. L'étude des invertébrés aquatiques a été également validée. Les diatomées ont été abordées également mais n'ont pas été retenues à ce stade ; le protocole devant être éprouvée en site sous couvert forestier.
- La géologie a également été retirée de l'étude car n'a pas été considérée comme prioritaire au regard de l'ensemble des autres volets.

Cette mission pluridisciplinaire a pu être menée en mai et juin 2023 avec succès. Les résultats sont présentés dans les parties qui suivent.

Missions réalisées :

| Missions | Dates | Etudes menées |
|----------|---------------------------------|---|
| ORION1 | 15-21/11/2022 | ADNe + caïmans + Lidar terrestre |
| ORION2 | 12-18/12/2022 | ADNe + Lidar terrestre |
| ORION3 | 17-26/05/2023 & 7-12/06/2023 | ADNe + caïmans + botanique + capture chiroptère + inventaire IA + inventaire poissons |

Tableau 1: Missions terrain ORION réalisées en 2022 et 2023 (financées par France Relance)

V. Matériels et méthodes

5.1 Axe biotique

5.1.a Inventaire ichtyologique par ADN environnemental :

Pour comparer les cortèges de poissons ensemble et évaluer l'impact de l'orpaillage illégal, il a fallu définir des criques comparables. Etant donné que nous n'avions aucune connaissance des cours d'eau du secteur Nord-Est, il a été choisi pour réduire la variabilité de concentrer l'effort sur le bassin versant de la Comté qui est le plus impacté et de prendre des cours d'eau de taille comparable. Pour cela, le réseau hydrographique de la BDcarthage a été utilisé pour prendre des cours d'eau d'ordre Strahler similaire (rang 3) et avec une distance à la source équivalente.

Afin d'optimiser la détection d'ADN, les missions se sont déroulées en saison sèche (novembre et décembre 2022)

Sur le terrain, pour chaque cours d'eau échantillonné, deux réplicats ont été faits en simultané avec des kits vigiDNA et un système pour pomper l'eau. En général, il est plutôt recommandé d'avoir des volumes de filtration équivalents pour comparer (~30L). La logistique sur place n'a malheureusement pas permis de mesurer le volume d'eau filtré pour chaque capsule, en revanche un temps de 30 min de filtration a été utilisé pour uniformiser au mieux les résultats. Une solution tampon est ensuite utilisée pour stabiliser l'ADN fixé sur le filtre.

Sur chaque cours d'eau, une description brève du substrat et de l'environnement a été faite et une mesure de la turbidité a été faite. Les capsules ont ensuite été envoyées à SPYGEN pour la partie extraction d'ADN, séquençage et bioinformatique.

La liste des espèces produite a ensuite été confrontée à la liste des espèces connues du bassin Versant fournie par Pierre-Yves Lebaill pour validation.

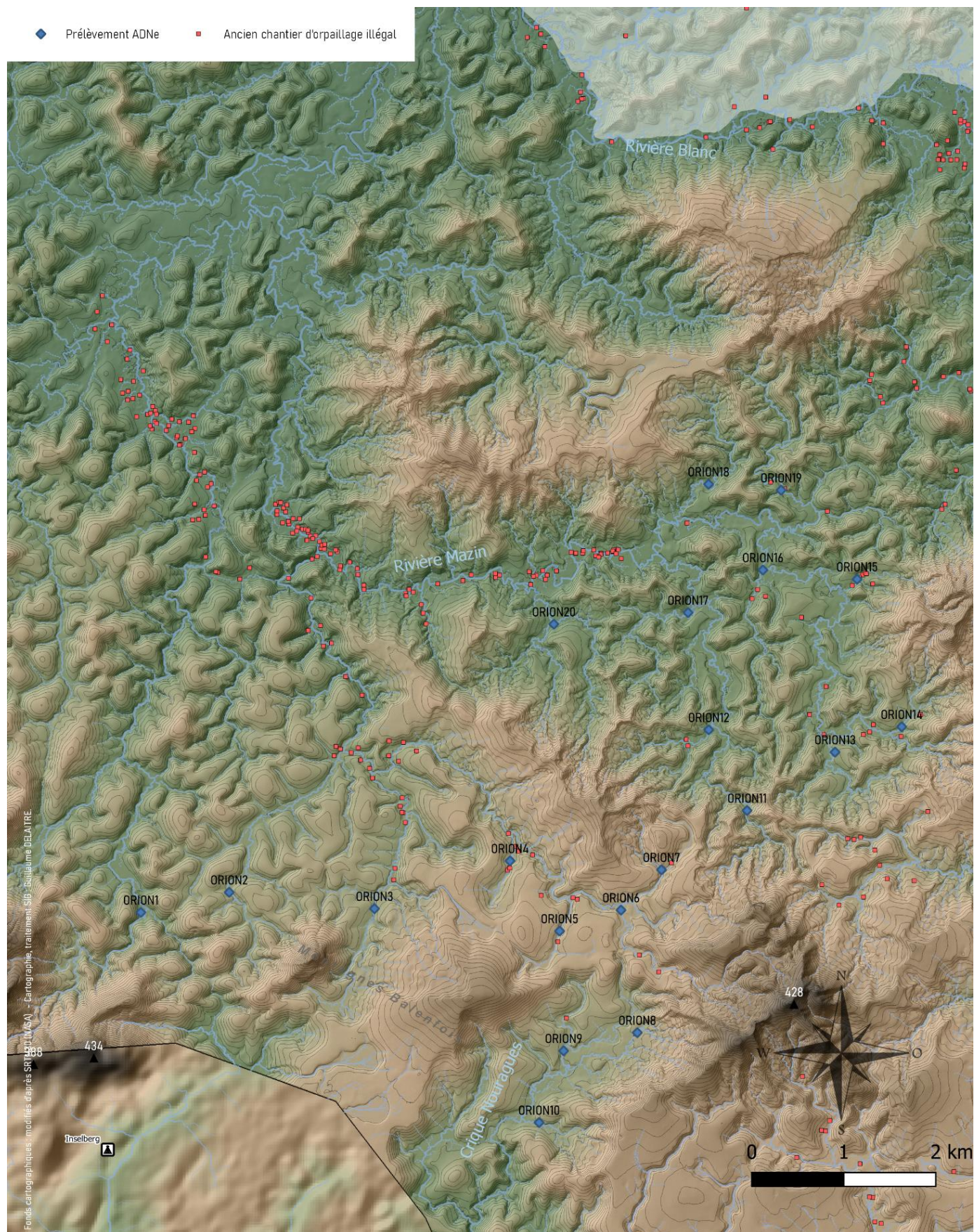


Figure 17 : Plan d'échantillonnage ADN environnemental durant les missions de novembre et décembre 2022

5.1.b Inventaire ichthyologique par pêche à l'électricité

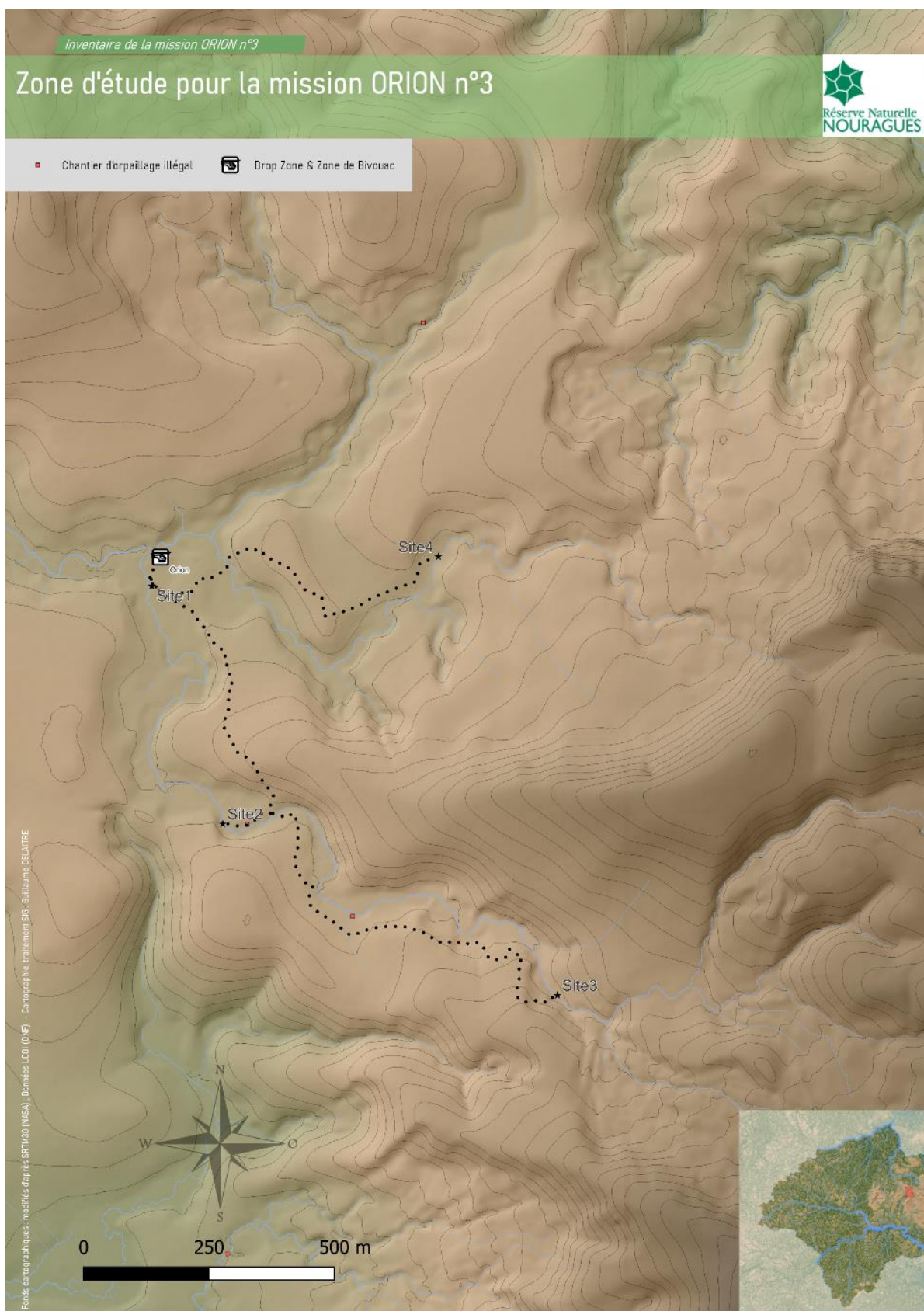


Figure 18 : Carte des sites d'échantillonnages pour l'inventaire pêche à l'électricité, invertébrés aquatiques et physicochimie

L'inventaire a été réalisé par le bureau d'étude Hydréco en juin 2023.

En l'absence d'état initial, le protocole utilisé ici est de type « Control impact » pour comparer deux sites supposés intacts et deux sites impactés par l'orpaillage illégal.

Les Sites (Site1 et Site2) ont été impactés par des chantiers en amont. La dernière activité d'orpaillage connue sur le secteur remonte à septembre 2021.

Le Site3 ne présente pas d'impact en amont. Le Site4 ne présente pas d'impact récent, en revanche de très vieux cônes de gravier et de vieilles bouteilles en verre semblent indiquer une activité ancienne au début du XXème siècle.

Pour chaque station, une gamme de variables environnementales a été mesurée :

- La largeur du lit mouillé, la profondeur et la vitesse de courant sur les transects transversaux (espacés systématiquement de 5 mètres) ;
- La conductivité spécifique en utilisant une sonde multi-paramètres oxygène / pH / conductivité / turbidité (Tripod Ponsel Aqualabo). La conductivité ambiante a ensuite été calculée à partir de la conductivité spécifique (pour une température de référence de 25°C) et de la température ambiante de l'eau (Mackereth et al., 1978) ;
- Les pourcentages de recouvrement du substrat (sable, gravier, galet, blocs et dalles), des macrophytes et de litière ont été estimés visuellement.

Pour cette étude, l'appareil utilisé est le Patagaï (4000 W, Atauce France, Figure 2). Il permet de délivrer du courant continu avec une tension et une intensité conséquente et stable (en fonction de la conductivité des zones de pêches) sur de longues durées. Sa configuration est détaillée par Pottier et al. 2020. L'anode est un anneau en aluminium de 35 cm de diamètre. La cathode est constituée d'une double tresse de cuivre de 300 cm.

La tension réglée sur l'appareil était de 1000 V pour correspondre aux conditions d'application dans ce contexte de basse conductivité (Pottier et al., 2020 ; Raitif et al., 2022).

Avant l'application de l'électricité dans l'eau, le champ électrique a été mesuré à l'aide d'une sonde « Penny » selon les recommandations de Pottier et al. (2019, 2020a, 2022a). Cela permet de vérifier la dispersion du champ électrique dans l'eau afin de garantir une bonne attractivité des individus tout en limitant l'impact sur leur intégrité physique.

Le protocole d'échantillonnage utilisé est le protocole d'échantillonnage ponctuel d'abondance (EPA), avec 33 points d'échantillonnage par site en positionnant l'anode tous les 3 mètres en alternant rive gauche et rive droite ou au centre lorsque le cours d'eau fait moins de 3 mètres de large.

Pour chaque point de pêche, la séquence suivante est réalisée :

- 20 secondes d'application de l'électricité dans l'eau ;
- Une coupure brève du courant (~ 1 seconde) ;
- Une nouvelle impulsion d'électricité est créée pendant 10 secondes.

Les poissons et crevettes capturés sont ensuite stockés dans des seaux d'eau pour identification et mesure de la biométrie. Ils sont ensuite relâchés plus loin en aval pour éviter un maximum de pertes.

5.1.c Inventaire des invertébrés aquatiques :

L'étude a été menée sur les mêmes sites que pour la pêche à l'électricité (Figure 18) par le bureau d'étude ONIKHA en mai 2023.

Les paramètres physicochimiques pH, Température, l'Oxygène dissous ainsi que la turbidité ont été réalisés sur l'ensemble des quatre stations. Une analyse du pourcentage des substrats a également été faite.

Le protocole PEZADA (Protocole d'Echantillonnage des Zones Amont ou Difficiles d'Accès) DCE a été appliqué.

Basé sur l'adaptation de la méthodologie NFT90-333, ce protocole spécialement conçu pour répondre aux spécificités du contexte guyanais (accessibilité, substrats...) est employé sur l'ensemble du réseau de suivi en Guyane dans les programmes de surveillance de la qualité de l'eau. Il permet donc une intercomparaison des résultats à l'échelle régionale.

Il est employé dans l'hydroécorégion 52 du bouclier guyanais composée de la pénéplaine et des reliefs où se situe la zone d'étude.

Pour chaque station :

- 8 prélèvements élémentaires d'habitat organique au filet Suber (500 µm)
- 4 prélèvements élémentaires d'habitat minéraux au filet Suber (500 µm)

Les prélèvements sont répartis au sein des habitats en fonction de leur représentativité (% de recouvrement) et de leur caractère biogène.

Les échantillons sont ensuite pré-triés sur le terrain puis stockés dans de l'alcool à 80°.

Les échantillons sont ensuite tamisés (à 500µm) puis identifiés à la loupe binoculaire.

Le niveau de détermination requis est le niveau générique pour les insectes à l'exception des diptères identifiés à la famille. Les crustacés et mollusques sont identifiés au genre ou à l'espèce. Les groupes mineurs (Nemathelmintha, Hydrachnidia...) sont identifiés au niveau taxonomique supérieur tels que la classe, l'ordre ou l'embranchement.

5.1.d Inventaire de la faune terrestre :

Pièges photographiques :

Afin de mieux connaître l'impact des activités d'orpaillage illégal sur la biodiversité terrestre nous avons fait l'acquisition d'un dispositif de 38 pièges photos.

Malheureusement, la livraison du matériel est arrivée après la date de fin de projet, nous n'avons donc pas pu mettre en place le dispositif souhaité. Une mission en octobre 2023 sur dotation de la Réserve a été menée par la suite pour l'installation du matériel.

Nous proposons néanmoins ici de présenter le plan d'échantillonnage prévu.

L'objectif des pièges photos est de connaître l'impact de la chasse (mais en partie aussi par la fragmentation des habitats forestiers) induite par la présence des orpailleurs dans la Réserve. Pour cela nous souhaitons suivre les espèces suivantes, potentiellement concernées par la chasse opportuniste ou la fragmentation des habitats forestiers :

| Espèce | Surface de l'aire de vie d'un individu |
|--------------------------|--|
| Hocco | 1 km ² |
| Tinamou | < 0.5 km ² |
| Tapir | 14 km ² |
| Tatous à 9 bandes | < 0.5 km ² |
| Agouti | 0.1 km ² |
| Pac | 0.1 km ² |
| Pécari à collier | 3 km ² |
| Pécari à lèvres blanches | 110 km ² |
| Biches | 1 km ² |

Tableau 2: Surface de l'aire de vie selon les espèces de grande faune (issue de la littérature scientifique)

Il existe plusieurs manières de disposer les pièges photos :

L'approche Systematic random est la plus courante dans la littérature. A partir du moment où nous avons assez peu de connaissances sur les microhabitats forestiers et leur occupation par la grande faune, mais également lorsque l'on cible plusieurs espèces, il est préférable de choisir ce type de schéma d'échantillonnage.

Etant donné la faible probabilité de détection en Guyane et l'absence de connaissance très fine sur la surface utilisée par la grande faune, il est recommandé de laisser les pièges au même endroit pendant un temps conséquent de plusieurs mois (au minimum 6 mois).

Pour l'espacement des pièges photos, en général la littérature recommande un espacement de 1 km pour éviter de capturer un même animal sur plusieurs pièges photos et de respecter le critère d'indépendance nécessaire aux analyses de type « site occupancy ». En effet, la majeure partie des espèces ciblées a une surface d'aire de vie < 1 km².

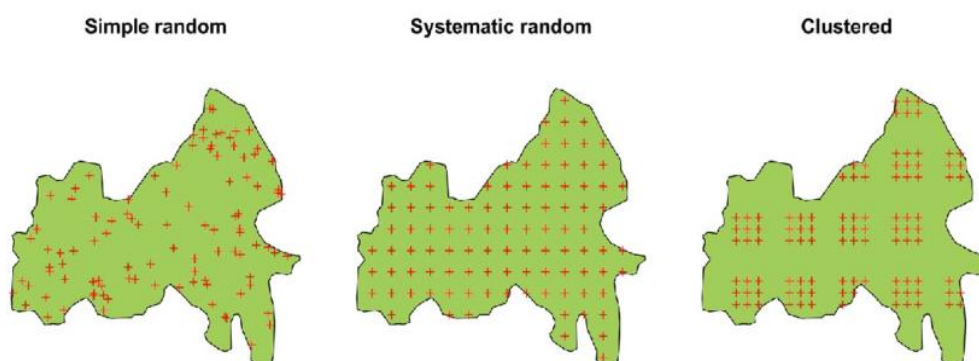


Figure 19 : Plans d'échantillonnage de pièges photos possible. Wearn et al. 2017

En revanche, certaines études ont montré le manque de répétabilité et des biais dans l'estimation de probabilité de détection lorsque l'on considère un seul piège photo mis aléatoirement par km². (Stokeld et al. 2016, O'Connor et al 2017, Evans et al. 2019, Wrong et al. 2019, Pease et al. 2016, Kolowski et al. 2021). Cela doit-être d'autant plus vrai en Guyane avec sa riche mosaïque de microhabitats forestiers où la distance de détectabilité peut grandement varier. Il sera nécessaire de capturer un maximum de variables pour maîtriser au mieux la probabilité de détection (piquet de distance, variable densité de végétation au sol, présence de passage à faune...)

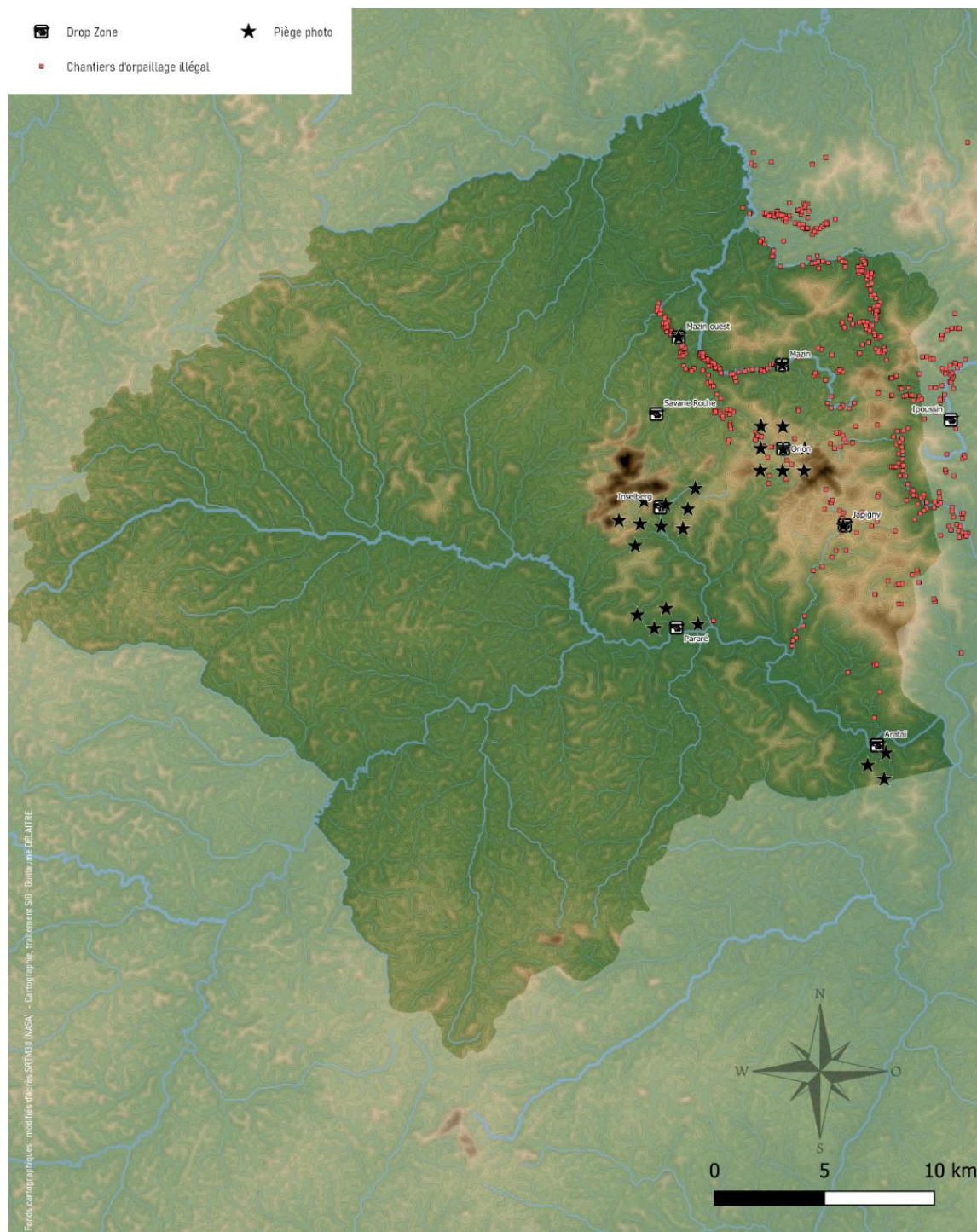


Figure 20 : Plan d'échantillonnage prévu pour l'installation des pièges photos

Inventaire acoustique :

Nous avons fait l'acquisition de 50 enregistreurs de type Audiomoth dans le cadre de ce projet. Malheureusement, la commande a pris énormément de retard à la livraison, seuls quelques tests ont pu être réalisés à ce jour avec les 5 capteurs que nous avons déjà.

L'objectif de cette approche est d'obtenir des données d'inventaire sur une grande échelle spatiale et de construire des protocoles de suivi pour observer les différences d'assemblage sonore sur une ripisylve le long d'un gradient de perturbation.

Cela va permettre à la fois de mieux connaître les espèces présentes sur des secteurs où nous n'avons pas les moyens de fournir des efforts de prospection suffisant, mais aussi de comparer des ripisylves impactées et non impactées (difficulté d'accès). Le même maillage que pour les pièges photos sera utilisé pour des raisons logistiques. D'autres capteurs seront installés proches de Drop zone pour augmenter nos connaissances sur le secteur.

La Réserve est déjà partenaire du projet de recherche DARKSOUND (J. Sueur, C. Thébaut) qui cherche à développer une approche de monitoring acoustique passive pour la détection et identification automatique de chants d'oiseaux nocturnes.

A terme, nous souhaitons développer avec le milieu de la recherche des pipelines d'analyse permettant le traitement de ces fichiers audios pour en sortir des indicateurs et une liste d'espèces.

L'utilisation de capteurs a également plusieurs intérêts d'un point de vue scientifique, notamment la forte reproductibilité, la possibilité de comparer des sites proches spatialement en simultané pour avoir des conditions d'écoute similaires sur l'ensemble des points via l'installation d'un plan d'échantillonnage en maillage.

A ce stade, nous avons installé un capteur sur 4 stations différentes sur 2 ripisylves intactes et 2 ripisylves impactées. Les enregistrements ont été réalisés sur 2 jours avec de grandes plages horaires, afin de mieux connaître la phénologie des espèces (pic d'activité...).

Cette liste d'espèces préliminaire va nous permettre d'alimenter la base de données acoustique d'entraînement de l'algorithme de deep-learning qui est en cours de développement par le chargé de projet scientifique de la Réserve.

Pour les besoins de cet algorithme, il nous a été nécessaire d'annoter à la main plusieurs centaines de fichiers .wav avec le logiciel Raven Pro. Cela nous a permis dans un premier temps de constituer une grosse base de données locale de sons qui est en cours de transfert sur la base de données publique Xenocanto (pour la partie avifaune).

Inventaire botanique :

Il n'y a pas eu de protocole particulier mis en place pour l'inventaire. La zone ayant été très peu déforestée même sur les zones de chantier, il a été complexe de calibrer un protocole à l'avance pour comparer les ripisylves. La flore de sous-bois et les arbres ont été inventoriés et mis en herbier. Certains spécimens d'arbres ont été collectés au fusil.

Un total de 7 points d'échantillonnage ont été réalisés afin d'améliorer les connaissances de la flore et notamment de la ripisylve. Deux des sites étaient en bordure de barranques.

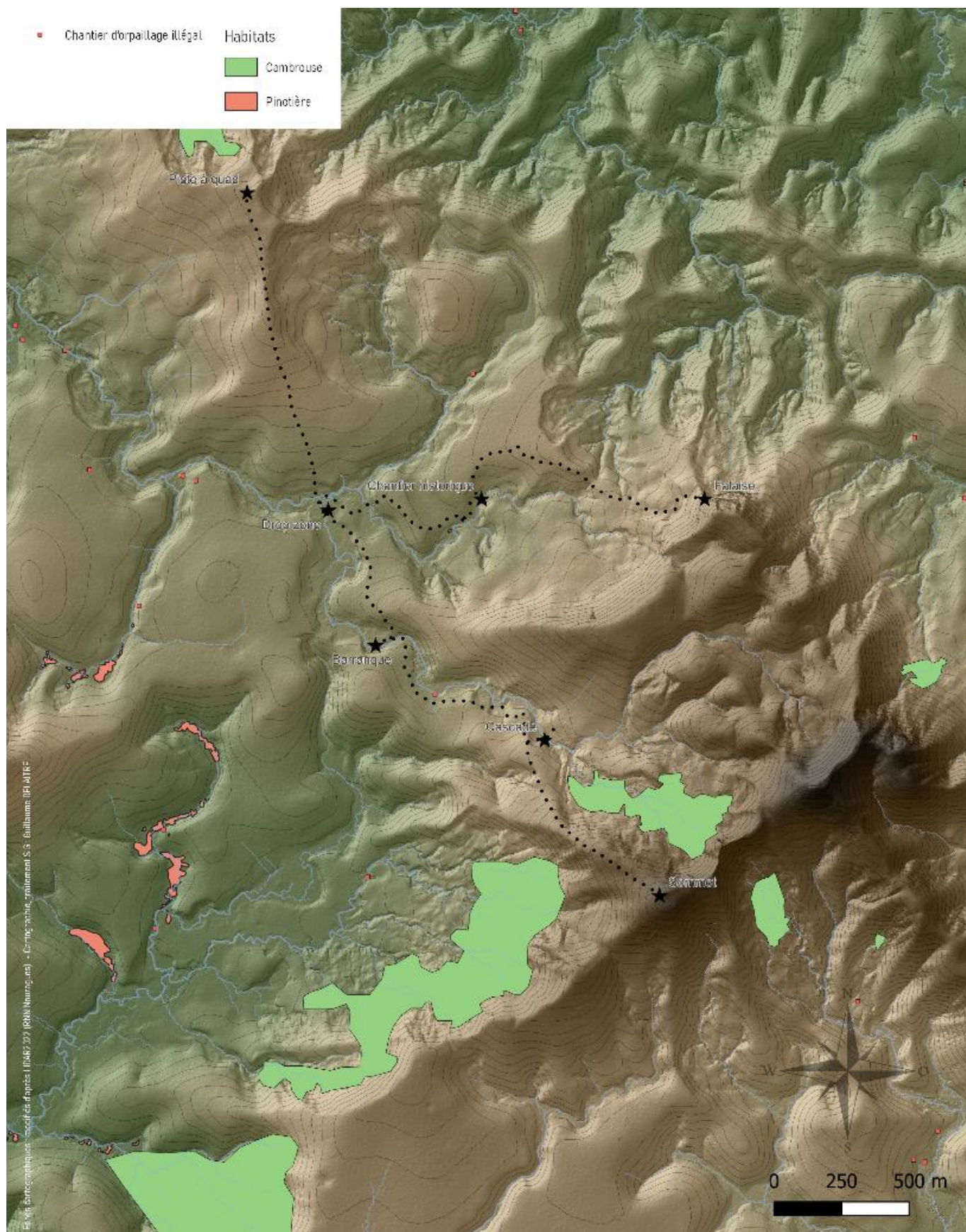


Figure 21 : Plan d'échantillonnage des inventaires botaniques en mai 2023

5.2 Axe abiotique

5.2.a Traitement cartographique :

La principale source de données utilisées est une acquisition LiDAR réalisée en novembre 2022 via un financement France-Relance sur 70 000 hectares.

Des traitements sur les données ont été faits pour obtenir différentes résolutions de Modèle Numérique de Terrain (2m, 1m et 50 cm) et un Modèle de Hauteur de Canopée (résolution 1m).

A partir du Modèle Numérique de Terrain de résolution 1m, un réseau hydrographique de l'ensemble du sous-bassin versant étudié a pu être généré à partir du workflow GRASS sous QGIS. Une classification par ordre de Strahler a ensuite pu être réalisée ainsi qu'un calcul de la distance site ADNe à la source pour corriger les premières estimations réalisées à partir des cours d'eau de la BDcarthage.

Un calcul de la pente (via le workflow GRASS) a été fait sur le Modèle Numérique de Terrain à une résolution de 50 cm. Cela nous a permis de détecter les secteurs de cascade (rupture de connectivité naturelle) et a permis d'interpréter les résultats des communautés de poissons via l'inventaire ADNe.

La détection des surfaces travaillées s'est faite à partir d'un algorithme de détection des dépressions sur le Modèle Numérique de Terrain. On observe néanmoins une sous-détection de certains chantiers, notamment lorsque les barranques ont été refermées, dans le cadre d'activité primaire, ou encore sur les vieilles exploitations qui n'utilisaient pas de barranques. Les détections de barranques avec les données de l'USN-ONF semblent très bien concorder avec la carte de répartition des chantiers issues des données de l'USN-ONF.

Pour l'analyse des ripisylves, un tampon de 20m a été réalisé autour des secteurs de barranques pour délimiter les secteurs impactés.

Un tampon de 20m a ensuite été créé autour du nouveau réseau hydrographique pour former une couche ripisylve. Ce tampon de ripisylve a ensuite été catégorisé en impacté vs non impacté à partir du recouvrement ou non des tampons de secteurs impactés. Cette couche a ensuite été utilisée comme masque pour extraire les données de Modèles de Hauteur de Canopée associées à la ripisylve et avec une classification impactée ou non impactée.

Concernant les données LiDAR terrestre, plusieurs scans ont été réalisés sur différents sites pour servir de calibration au LiDAR aérien.

Le capteur utilisé est le BLK360 monté sur un trépied. Plusieurs scans ont été réalisés par site.

Pour chaque site, les nuages de points des différents scans ont été co-registrés sur le logiciel Cloud-Compare en combinant successivement des alignements de couche manuels et des algorithmes d'ICP (Iterative Closest Point) jusqu'à avoir une scène cohérente. Les nuages de points sont ensuite fusionnés (sous CloudCompare).

Pour géoréférencer les nuages de point LiDAR terrestre, nous nous sommes basés sur les coordonnées gps dans un premier temps. Nous avons ensuite extrait un Modèle Numérique de Terrain (MNT) et un Modèle de Hauteur de Canopée (CHM) à partir des données LiDAR terrestre pour faire un alignement sur les MNT et CHM du LiDAR aérien qui est déjà géoréférencé. La projection nécessaire pour un alignement est ensuite réutilisée sur le nuage de points LiDAR terrestre.

5.2.b Caractérisation de l'habitat aquatique :

Sur l'ensemble des 20 sites d'inventaire ADN environnemental :

- Une mesure de la largeur et profondeur de cours d'eau a été réalisée
- Une classe de débit a été attribuée
- Une mesure de la turbidité a été faite
- Description grossière du substrat
- Ordre de Strahler calculé à partir du réseau hydrographique obtenu à partir des données LIDAR

Les missions itinérantes ne nous ont pas permis pour des raisons de volume et de poids de sacs d'embarquer une sonde multiparamétrique et de prélever des échantillons d'eau pour une analyse en laboratoire.

Sur les 4 Sites étudiés en pêche à l'électricité et invertébrés aquatiques, un inventaire de l'habitat type CARHYCE a été effectué, des mesures avec une sonde multiparamétrique (T°C, conductivité, turbidité, Oxygène dissous) ont été faites.

Hydréco a fait des prélèvements d'eau sur l'ensemble des 4 stations pour mesurer :

- Carbone organique total (mg/L)
- Azote total Kjeldahl (mg/L)
- Azote ammoniacal (mg/L)
- Phosphore total (mg/L)
- Mercure aquatique (µg/L)
- Indices hydrocarbures (mg/L)

5.3 Axe écotoxicologie

5.3.a Etude de l'écotoxicologie des caïmans gris :

Une prospection a eu lieu par deux chercheurs (Jérémy Lemaire & Rosanna Mangionne, de l'Université de Vienne) en novembre 2022 et en mai 2023.

En novembre 2022, la prospection était opportuniste la nuit lors de notre mission itinérante d'inventaire ADN. L'aspect itinérant n'a pas été favorable pour la détection d'individus.

Un seul caïman gris a pu être repéré mais a eu un comportement de fuite.

En mai 2023, l'intégralité de la mission a eu lieu à proximité de la Drop Zone ORION, la saison des pluies a permis la détection de plus d'individus, notamment dans la barranque de la DZ ORION. Le milieu de barranque n'est pas favorable à la capture d'individus. Un premier individu a pu être attrapé, mais il était trop gros pour pouvoir être manipulé pour le reste des prélèvements et a donc été relâché instantanément.

Un second individu, plus jeune a été capturé.

Une écaille a été prélevée sur l'individu capturé pour une mesure du taux de contamination au mercure. Des prélèvements sanguins ont également été prélevés pour faire des tests hormonaux.

5.3.b Etude de l'écotoxicologie des chauves-souris :

Un inventaire des chauves-souris par capture au filet a été réalisé en mai 2023.

Un total de 60m de filets a été installé (5* 12m) et ouvert à 18h30 autour du camp de la Drop Zone ORION. Toutes les 30 minutes, les individus capturés dans le filet sont ramenés dans des pochons pour être identifiés, la biométrie a également été prise.

Des prélèvements de poils (coupe au ciseau pour ne pas être invasif) ont été réalisés et envoyés au chercheur Jérémy Lemaire pour une analyse du taux de contamination de mercure.

VI. Résultats

Pour des besoins de clarté dans l'explication des résultats, les axes sont regroupés par volet fonctionnel (Aquatique, Terrestre et Ecotoxicologique).

6.1 Axe Aquatique

6.1.a Etude à l'échelle macroscopique : Inventaire ichthyologique par méthode ADN environnemental

Sur l'ensemble de l'étude des 20 têtes de bassin, 54 espèces de poissons ont été détectées. La liste des espèces présentes est cohérente avec la liste du bassin versant de la Comté fournie par Pierre-Yves LeBail.

Une analyse NMDS permet de voir que les répliquats d'ADN environnemental sont très proches entre eux, ce qui va dans le sens de la bonne qualité du travail d'extraction d'ADN et de terrain.

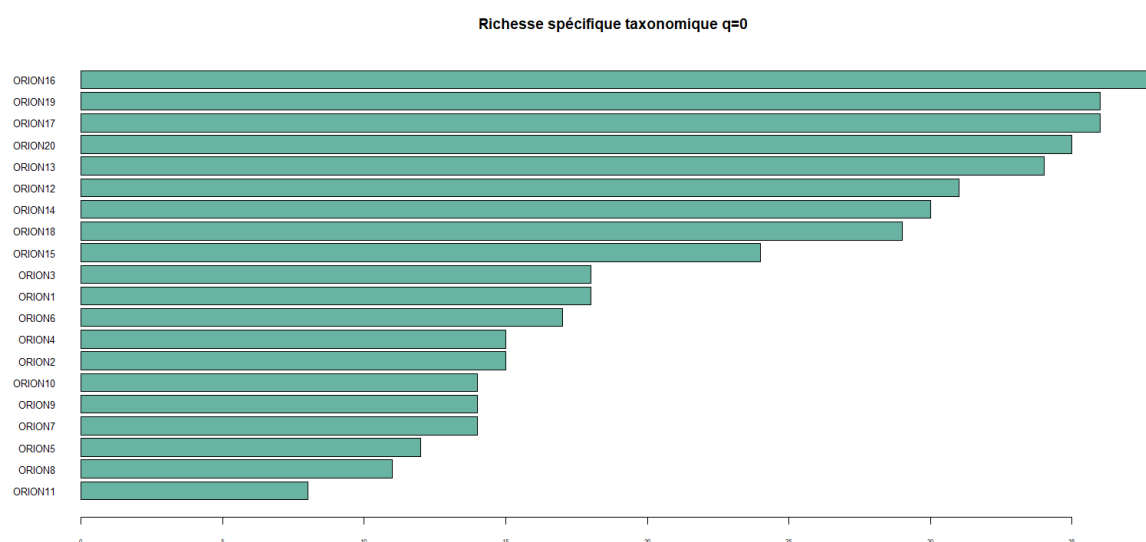


Figure 21 : Nombre d'espèces de poissons par site

On observe une forte disparité en nombre d'espèces de poissons selon les sites avec 8 espèces au minimum et 38 espèces au maximum.

Cette disparité va être essentiellement expliquée par des variables environnementales très simples. A partir d'un modèle linéaire, nous arrivons à expliquer 90% de la variance en nombre d'espèces avec les seules variables « Altitude », « Présence ou non de rupture de connectivité naturelle » et « Distance à la source ».

Plus l'altitude est élevée, plus la diversité en poissons est faible. En cas de présence de rupture de connectivité naturelle, la diversité va également être plus faible en amont.

Pour l'interprétation de la Figure 22, le boxplot montre la médiane de la richesse en espèce, la partie colorée montre la distribution des résultats des différents groupe. Par exemple on voit que la majorité des sites ont une richesse spécifique proche de la médiane pour les sites en amont de rupture de connectivité naturelle (orange), là où on observe plus de variabilité pour les autres sites. Cela rejoint les résultats des études déjà menées (Cilleros et al. 2017)

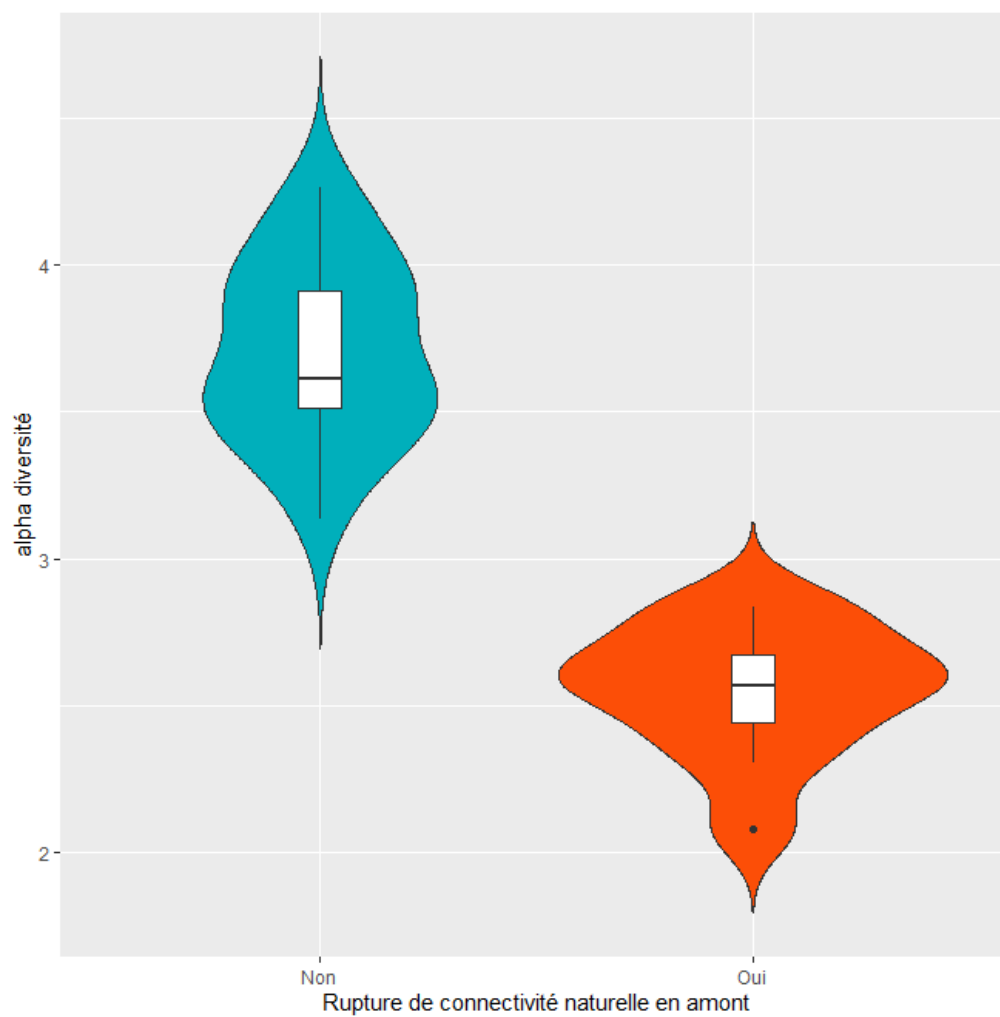


Figure 22 : Nombre d'espèces selon si le site présente une rupture de connectivité naturelle ou non ($p < 0.01$)

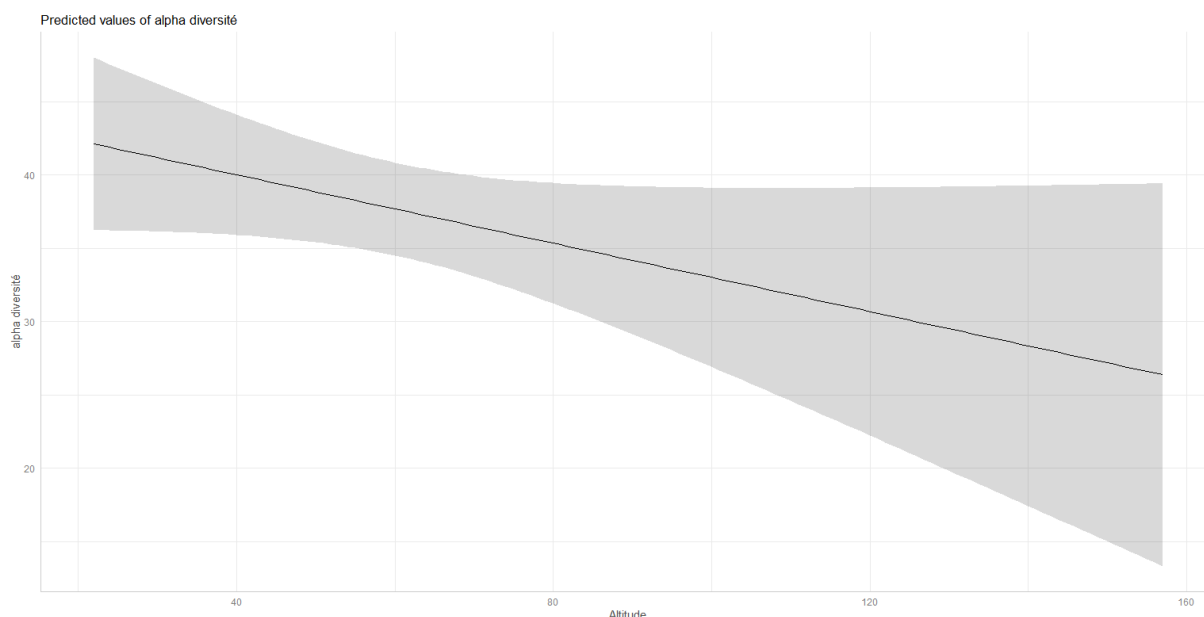


Figure 23 : Nombre d'espèces de poissons en fonction de l'altitude ($p < 0.01$)

L'analyse de la β -diversité rejoint également ces résultats, avec des communautés de poissons similaires entre sites avec des conditions environnementales similaires.

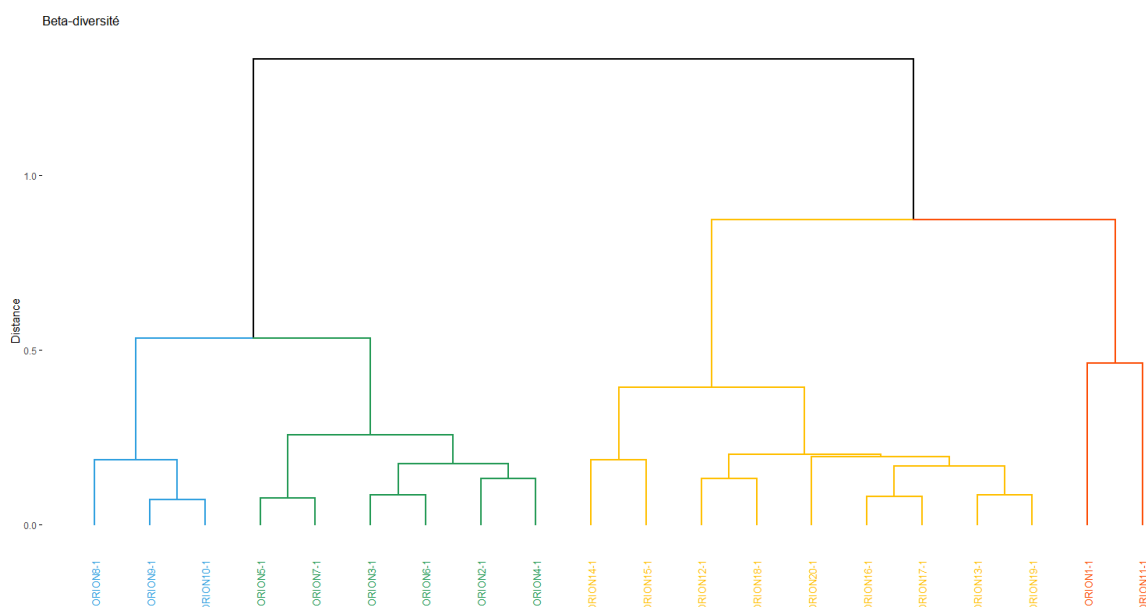


Figure 24 : Dendrogramme de la dissimilarité en termes de composition d'espèces de poissons entre sites

Sur le dendrogramme (Figure 24), on retrouve les sites en amont de rupture de connectivité naturelle sur la branche de gauche (vert + bleu).

Les sites agrégés en bleu sont les 3 sites du bassin de l'Approuague.

Les sites en vert sont les sites du bassin Versant de la Comté en amont d'une rupture de connectivité naturelle.

En jaune, il s'agit des sites de plus basses altitudes avec des débits beaucoup plus lents.

En orange, il s'agit des sites qui sont à l'interface écologique entre les zones de rupture de connectivité naturelle et d'altitude.

Nous n'observons aucun effet de la présence ou non de l'orpaillage illégal sur la richesse spécifique et sur la bêta-diversité. Cela rejoint plusieurs travaux de recherche (Coutant et al. 2023, Cantera et al. 2019). En revanche, de très nombreuses publications montrent que la diversité fonctionnelle des poissons est un meilleur indicateur des impacts de l'orpaillage illégal. (Cantera et al. 2023, Cantera et al. 2022, Coutant et al. 2023...).

Pour étudier la diversité fonctionnelle, nous nous sommes basés sur les résultats de PCOA de la base de données de traits (Cantera et al. 2023) et avons utilisé le package R 'multidimFD' pour générer les différents indices de diversité de traits.

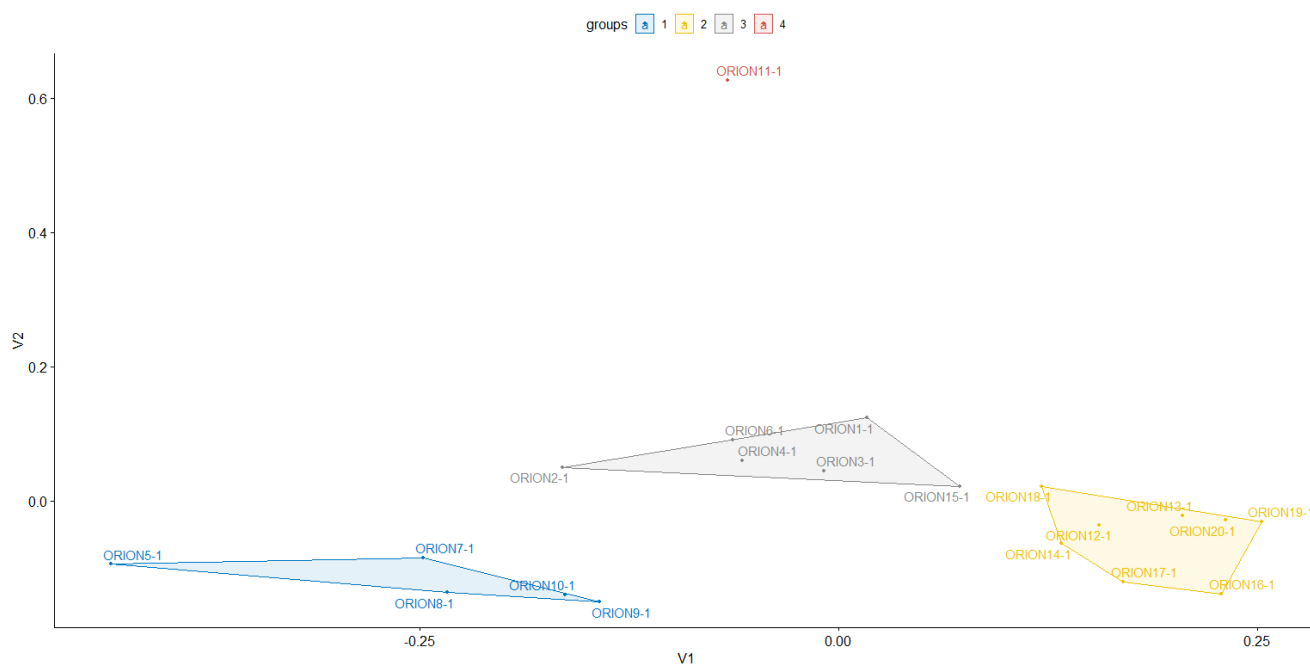


Figure 25 : Distance entre les sites selon leur similarité en termes de composition fonctionnelle de poissons

La NMDS (Non-metric Multidimensional Scaling) consiste en une réduction de dimension tout en conservant les distances (similarité/dissimilarité) entre chaque point. Les axes représentent des dimensions abstraites qui capturent la distance en termes de composition fonctionnelle. Ainsi, plus les points sont proches, plus la composition fonctionnelle de ces points est proche. Le NMDS met en lumière plusieurs clusters en termes de traits fonctionnels.

En jaune, ce sont les sites qui n'ont pas de rupture de connectivité naturelle en aval. On va retrouver une certaine homogénéité entre sites malgré la présence d'impacts avérés sur certains de ces sites. Les impacts de ces secteurs sont assez anciens avec pour la plupart des impacts antérieurs à 2017 et le plus récent de 2020. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ces résultats.

- 1) Les sites considérés comme non impactés sont finalement également impactés. (Hypothèse peu probable au regard de l'exploitation des détections LiDAR des chantiers.
- 2) Ces sites sont rentrés en résilience après un long temps d'inactivation de chantiers et le maintien du couvert forestier.

En gris et en bleu, se trouvent des sites en amont de rupture de connectivité naturelle. Les différences entre ces deux groupes sont la perte des espèces spécialistes « *Hartiella longicauda* » et « *Paralithoxus planquettei* » ainsi qu'une diminution d'espèces piscivores dans le groupe bleu malgré des habitats très similaires.

La quasi-globalité des sites du groupe bleu a été orpaillée illégalement récemment avec de grosses modifications du linéaire de cours d'eau. Le seul site du groupe bleu à ne pas être connu pour avoir été orpaillé est le site ORION9. Lors de la campagne d'inventaire, l'USN-ONF émettait quand même des réserves sur l'absence d'impacts sur le site ORION9 au regard des traces de colmatage sur place. Le LiDAR n'a pas nettement permis de trancher sur la présence ou l'absence de chantiers en amont de ce site, en revanche, la détection de très nombreux layons autour de ce site laisse présager une possibilité d'impacts en amont.

Le groupe gris comporte quant à lui une majorité de sites intacts. Certains sites impactés récemment sont néanmoins présents dans ce groupe avec un maintien des espèces spécialistes.

Il est difficile à ce stade de vraiment tirer des conclusions sur la raison pour laquelle certains sites en amont de zone de rupture de connectivité restent en résilience fonctionnelle et d'autres non.

Parmi les hypothèses pouvant être avancées :

- 1) Le maintien d'une zone en amont intacte contenant les espèces spécialistes a permis une recolonisation plus rapide sur les zones anciennement impactées en aval très proches
- 2) La différence pourrait s'expliquer sur une différence d'intensité des chantiers où sur les sites ORION4 et ORION6 du groupe gris pour lesquels les impacts sont nombreux mais assez peu directement sur le lit mineur contrairement aux sites du groupe bleu dont le lit mineur semble avoir été bien plus impacté.
- 3) Pour une grande partie des sites du groupe bleu, (ORION8, 9,10), ces sites se trouvent au-dessus d'une très grande cascade. On peut envisager le fait que la recolonisation d'espèces spécialistes après un impact puisse également se faire sur des pas de temps bien plus longs que pour les autres sites qui sont mieux connectés entre eux.

Il est également difficile d'interpréter la différence de réponse fonctionnelle aux impacts de l'orpaillage illégal entre les sites en amont de cascade et les autres. En raison d'une différence d'ancienneté des impacts entre les deux régions, il est difficile de savoir si la différence de réponse fonctionnelle est due à un temps après impact non suffisant pour observer une recolonisation de certaines espèces ou si certaines espèces avec des traits fonctionnels très particuliers (spécialistes) sont beaucoup plus sensibles que les autres aux impacts.

Il est intéressant de noter l'isolement fonctionnel du site ORION11 dans le NMDS. C'est le seul site à ne présenter aucun Gymnotiforme pourtant très ubiquiste et c'est également le site le moins diversifié. A ce jour, aucun impact n'est connu en amont de ce site, des décrochements ont eu lieu sur les flancs de montagne et il est assez complexe à ce stade de savoir s'ils sont naturels ou non. La détection de pistes à proximité laisse planer le doute. La présence d'une grosse piste à quad très utilisée sur la crête qui longe le cours d'eau a potentiellement pollué la rivière par ruissellement par le passé, et notamment de manière chronique. De plus, c'est un site au-dessus d'une zone de cascade très éloigné des autres criques similaires, ce qui a potentiellement joué sur une plus lente recolonisation si des impacts chroniques ont eu lieu. Ce site est complexe à interpréter à partir des seules données dont nous disposons. Il serait intéressant de compléter l'étude de ce site à l'avenir avec un inventaire des invertébrés aquatiques.

Notre étude s'intéresse principalement à de la comparaison spatiale entre sites, mais il nous manque une composante temporelle pour suivre l'évolution de la biodiversité au fil du temps. La méthode ADN environnemental n'a jusqu'ici été assez peu étudiée dans le cadre de suivi temporel de la biodiversité aquatique. Afin d'évaluer le potentiel de cette méthode pour assurer nos suivis au long terme, nous avons comparé les 2 sites impactés ORION6 et ORION7 en saison sèche novembre 2022 puis en saison des pluies en juin 2023.

Tableau 3: Comparaison présence-absence spécifique temporelle pour 2 stations de prélèvements

| Espèces | ORION6 11/2022 | ORION6 06/2023 | ORION7 11/2022 | ORION7 06/2023 |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| <i>Anablepsoides igneus</i> | | | | |
| <i>Ancistrus cf. leucosticus</i> | | | | |
| <i>Batrochoglanis raninus</i> | | | | |
| <i>Bryconamericus guyanensis</i> | | | | |
| <i>Bryconops affinis</i> | | | | |
| <i>Callichthys callichthys</i> | | | | |
| <i>Gymnotus aff. coropinae</i> | | | | |
| <i>Gymnotus carapo</i> | | | | |
| <i>Harttiella longicauda</i> | | | | |
| <i>Helogenes marmoratus</i> | | | | |
| <i>Hoplias malabaricus</i> | | | | |
| <i>Ituglanis amazonicus</i> | | | | |
| <i>Krobia aff. guianensis sp. 1</i> | | | | |
| <i>Laimosemion geayi</i> | | | | |
| <i>Lithoxus planquettei</i> | | | | |
| <i>Saxatilia gr. albopunctata sp. 2</i> | | | | |
| <i>Synbranchus marmoratus</i> | | | | |

Dans le tableau ci-dessus, la couleur verte correspond à une présence de l'espèce, le rouge l'absence et l'orange correspond à une détection potentiellement peu fiable avec très peu de PCR positives (< 2/12 PCR positive).

On constate que globalement la comparaison temporelle sur deux saisons différentes sur les deux sites est assez cohérente et semble être assez stable. Il est difficile de pouvoir tirer des conclusions sur seulement deux répliquats, d'autant plus qu'il y'a potentiellement un effet saison qui pourrait expliquer les légères différences entre les deux sessions.

Les résultats issus de l'interprétation des données ADNe sont intéressants mais le manque de données environnementales (doutes sur la présence d'impact ou non, manque d'évaluation de la durée et intensité de l'impact) ne permet pas de tirer des conclusions définitives. Il reste une part de flou sur l'explication de pourquoi certains sites sont rentrés en résilience fonctionnelle malgré des impacts alors que d'autres non.

Ces résultats sont en revanche très intéressants pour nous aiguiller pour la suite de nos actions. En effet, à ce jour la majorité des études ADN environnementales sur les poissons en Guyane s'intéresse à des analyses spatiales. Il serait intéressant de ré-échantillonner certains cours d'eau du groupe fonctionnel bleu, qui ont perdu leurs espèces spécialistes malgré les habitats d'origine supposés favorables pour voir si on observe une modification du cortège d'espèces au cours du temps. (En nous basant sur le substrat, la pente et l'altitude).

6.1.b Etude pluridisciplinaire à l'échelle du site dit « ORION »

Quatre sites proches de la DZ ORION ont été étudiés pour la partie pêche à l'électricité, invertébrés aquatiques ainsi que la physicochimie. Une étude complémentaire sur les métaux lourds du caïman gris a également été réalisée.

Etude de l'ichtyofaune par pêche à l'électricité

Un inventaire par pêche à l'électricité a été réalisé sur les 4 sites par le bureau d'étude Hydreco (juin 2023). Nous présentons ici les principaux résultats. Pour aller plus loin, le rapport d'Hydreco est disponible en ligne sur www.nouragues.fr.

Pour la comparaison des sites, un diagnostic des habitats aquatiques a été réalisé. Ainsi le Site4 est le plus différent des sites en termes d'habitat, notamment avec une largeur de crique et une conductivité plus faible que pour les autres sites.

Au total 403 spécimens de poissons ont été capturés pour un total de 11 espèces et 78 spécimens de crustacés pour un total de 3 espèces.

Sur les 4 sites, l'espèce *Harttiella longicauda* (VU) faisant l'objet d'un Plan National d'action en Guyane a été trouvée. Cela confirme la présence de l'espèce sur le Bassin Versant de la Comté qui jusqu'à présent n'avait jamais pu être confirmée. Chacun de ces sites a été au préalable échantillonné par méthode ADN environnemental pour pouvoir comparer les deux méthodes d'inventaire.

La diversité est sensiblement la même entre les sites et correspond à ce que l'on peut s'attendre sur des têtes de bassin avec néanmoins de grosses différences en termes d'abondance, notamment au niveau des *Harttiella longicauda*.

Lorsque l'on prend seulement la présence/absence, le Site1 se distingue des autres. C'est en effet le seul site à ne pas avoir de *Crenicichla aff. albopunctata* sp2, d'*Ituglanis aff. nebulosus* et de *Laimosemion agillae*. Il est le seul à présenter *Synbranchus aff. marmoratus* et l'un des seuls à avoir des *Krobia aff. guianensis* sp1.

Le Site3 va également légèrement se distinguer des autres sites avec notamment la perte d'*Ancistrus cf. leucostictus* qui pourrait s'expliquer potentiellement avec une compétition trop forte avec les *Harttiella longicauda* qui sont très abondants sur cette station. Le Site 3 est également le seul à ne pas avoir de *Helogenes marmoratus*.

On observe une homogénéité des abondances par classe de taille chez *Harttiella longicauda* entre les différentes stations, qui semble indiquer une stabilité de la population et un maintien du cycle de reproduction. Il semblerait que l'on ait un effet distance à la source et d'altitude, avec une augmentation de l'abondance d'*Harttiella longicauda* et de *Paralithoxus planquettei* lorsque l'on remonte vers la source.

Le Site 4, pourtant présentant des fasciés relativement similaires au Site3 présente des abondances très faibles d'*Harttiella*. Il est néanmoins différent des autres sites avec une présence de matière organique accrue, une largeur plus faible et la présence de très nombreuses pinotières en aval. Le Site4 a également un couvert forestier qui semble plus prononcé que les autres, ce qui pourrait avoir influencé négativement la présence de biofilms, source de nourriture des *Harttiella* et *Paralithoxus*.

Nous ne pouvons malheureusement pas à ce stade interpréter de manière robuste cette différence au vu du nombre de sites prospectés. Cette étude est néanmoins la première à travailler sur l'estimation protocolée d'abondance d'*Harttiella* et permettra d'alimenter le Plan National de l'espèce et apporte plus d'informations sur son écologie qui est très parcellaire. Il est néanmoins important de noter la faible abondance d'espèces piscivores dans cette étude. Seul *Crenicichla aff. albopunctata* sp2 a été détecté et dans des abondances très faibles. Une seule observation d'*Hoplias malabaricus* a également été détectée hors protocole alors que c'est une espèce connue pour être ubiquiste. Les top-prédateurs sont souvent sensibles à l'altération du milieu avec notamment des pertes en quantité de proies, une visibilité plus faible en cas de turbidité, la perte d'habitat et avec la bioaccumulation de métaux lourds.

A ce stade, nous manquons de répliqués de sites pour pouvoir vraiment tirer des conclusions robustes concernant une différence entre sites impactés-non impactés, notamment parce que les sites « non impactés » ont potentiellement été impactés il y'a très longtemps. Les sites les plus impactés sont les sites les plus en aval, il est donc difficile de distinguer les effets altitudinaux des effets impacts. Les résultats restent néanmoins encourageants puisque nous avons des abondances relativement élevées d'espèces à enjeu se trouvant sur des sites assez impactés, indiquant une certaine résilience des espèces.

Les données d'abondance relative produites par cet inventaire sont à ce jour en cours d'analyse pour calibrer de nouvelles méthodes d'ADN environnemental permettant d'avoir accès aux abondances relatives des poissons, et permettrait en cas de succès d'avoir accès à de très précieuses informations de manière non invasives (Thèse de Céline Condachou).

Afin d'évaluer la pertinence de la liste d'espèces produites par ADN environnemental, un inventaire ADNe a été fait 2 jours avant le passage à la pêche à l'électricité.

Tableau 4: comparaison de la détection des espèces de poissons entre les méthodes ADNe et pêche à l'électricité (vert = présent ; rouge = absent) pour les quatre stations d'étude d'ORION

| Espèces | Site1 | | Site2 | | Site3 | | Site4 | |
|---|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| | ADNe | Expert | ADNe | Expert | ADNe | Expert | ADNe | Expert |
| <i>Anablepsoides igneus</i> | | | | | | | | |
| <i>Ancistrus cf. leucosticus</i> | | | | | | | | |
| <i>Batrochoglanis raninus</i> | | | | | | | | |
| <i>Bryconamericus guyanensis</i> | | | | | | | | |
| <i>Bryconops affinis</i> | | | | | | | | |
| <i>Callichthys callichthys</i> | | | | | | | | |
| <i>Guyanancistrus brevispinis</i> | | | | | | | | |
| <i>Gymnotus aff. coropinae</i> | | | | | | | | |
| <i>Gymnotus carapo</i> | | | | | | | | |
| <i>Harttiella longicauda</i> | | | | | | | | |
| <i>Helogenes marmoratus</i> | | | | | | | | |
| <i>Hoplias malabaricus</i> | | | | | | | | |
| <i>Ituglanis amazonicus</i> | | | | | | | | |
| <i>Ituglanis aff. nebulosus</i> | | | | | | | | |
| <i>Krobia aff. guianensis sp. 1</i> | | | | | | | | |
| <i>Laimosemion geayi</i> | | | | | | | | |
| <i>Laimosemion agillae</i> | | | | | | | | |
| <i>Lithoxus planquettei</i> | | | | | | | | |
| <i>Saxatilia gr. albopunctata sp. 2</i> | | | | | | | | |
| <i>Synbranchus marmoratus</i> | | | | | | | | |

Tableau 5: Comparaison méthodologique de détectabilité spécifique entre ADNe et pêche à l'électricité

| Sites | Nbre espèces ADNe | Nbre espèces expert | % similarité entre techniques |
|-------|-------------------|---------------------|-------------------------------|
| Site1 | 16 | 10 | 60% |
| Site2 | 16 | 10 | 50% |
| Site3 | 10 | 8 | 60% |
| Site4 | 14 | 12 | 60% |

Globalement, on constate que la technique ADN environnemental détecte plus d'espèces que l'inventaire par pêche à l'électricité couplé avec une prospection à vue. Il est important de déterminer si les espèces additionnelles via ADNe sont des faux positifs ou non. Une bonne partie des taxons détectés uniquement par ADNe sont cohérents car ont été aperçu par les experts sur les sites avoisinants.

En revanche, on constate que certains taxons n'ont été détecté qu'à la pêche à l'électricité (comme *Laimosemion agilae*). Au vu de la configuration des détections il semblerait que l'assignation taxonomique via les barcodes ait détecté cette espèce comme étant *Anablepsoides igneus*. Il était déjà connu que pour certains regroupements d'espèces de poisson, les séquences sur la région du marqueur poisson sont beaucoup trop proches pour faire une assignation taxonomique correcte.

Cela confirme l'importance de réaliser des inventaires classiques en complément des inventaires par ADNe pour aider à l'interprétation des résultats et corriger lorsqu'il le faut les erreurs d'assignation.

Si un suivi au long terme est lancé avec la méthode ADNe, il est souhaitable, *a minima* sur la première année du suivi, d'avoir un inventaire ichthyologique couplant diverses techniques de pêche pour interpréter les résultats.

Etude des communautés d'invertébrés aquatiques :

L'inventaire réalisé par ONIKHA (juin 2023) a permis de calculer les indices biotiques invertébrés actuellement utilisés en Guyane pour caractériser les cours d'eau : IBMG, IBMG2, SMEG. Nous présentons ici les principaux résultats. Pour aller plus loin, le rapport d'ONIKHA est disponible en ligne, sur le site internet www.nouragues.fr.

Chacune des stations échantillonnées abrite le cortège de taxons polluosensibles typique des têtes de crique.

Concernant les taxons polluosensibles rencontrés, on retrouve des Perlidae et de Philopotamidae.

Les top-prédateurs mégaloptères Corydalidae sont également présents, signe d'une communauté équilibrée et diversifiée.

Signalons la présence d'individus d'éphéméroptères du genre Baetodes ont également été récoltés sur le Site 3 (le plus en amont), il s'agit de la première mention pour le plateau des Guyanes de ce genre.



Figure 26 : le genre *Baetodes* (Baetidae), nouvellement cité pour la Guyane © Simon Clavier

Les 4 stations sont considérées comme très diversifiées au niveau du nombre de familles par rapport à la moyenne régionale des petites masses d'eau avec 40 taxons ou plus.

L'indice d'équitabilité de Pielou est > 0.6 pour chaque station ce qui correspond à une communauté d'invertébrés aquatiques équilibrée.

Ces valeurs sont très proches des petites masses d'eau potentiellement comparables de la Réserve Naturelle Nationale de La Trinité pouvant servir de référence.

L'étude des différents groupes trophiques fonctionnels ne montrent pas de différence par rapport aux sites de référence de la RNN de La Trinité.

Les indices biologiques SMEG et IBMG classent les 4 stations en très bon état écologique.

Les mesures de similarité/distance entre sites ne mettent pas en évidence de rupture écologique. Il s'avère que le lit mineur a été assez peu « travaillé » sur ce linéaire de cours d'eau, il y a finalement assez peu de canaux de dérivation et sur de très courtes distances. La majorité des impacts occasionnés par l'activité temporaire illégale sur ce secteur a probablement consisté en l'augmentation de la quantité de matières en suspension qui ont été progressivement lessivées par le régime torrentiel des cours d'eau.

Le rapport d'ONIKHA pointe le rôle important des actions LCOI menées sur la Réserve depuis 2021, qui ont contenu la pression trop importante, empêché que les chantiers prennent de l'ampleur, qu'il y ait une déforestation et que l'activité s'étale sur des pas de temps trop conséquent. De plus, le régime énergétique du cours d'eau permet un lessivage plus conséquent des pollutions engendrées. Ces conditions ont permis une très bonne résilience de ces sites.

En effet, des inventaires menés sur d'autres sites d'orpaillage illégal (projet RESORPI) ont mis en évidence, que passé un certain degré de perturbation, un blocage total des fonctions de résilience intervient. 10 ans après l'arrêt d'exploitation certains secteurs demeurent toujours en très mauvais état écologique.

Il sera à l'avenir, tout comme pour l'étude des poissons, intéressant de comparer ces sites avec des petites masses d'eau dont l'hydro-géomorphologie du lit mineur a été profondément modifiée sur un long linéaire (comme c'est le cas pour les sites proches de cette étude ORION5 et ORION7 en ADNe et pour lesquels nous avons pu constater une perte fonctionnelle sur le cortège de poissons).

Il serait également intéressant de refaire une étude sur des sites impactés plus en aval, sur des criques beaucoup plus larges, où les orpailleurs illégaux ont grâce à la taille du flat pu faire des chantiers beaucoup plus conséquents et ont déforesté la ripisylve. Au-delà de l'impact « local », ces sites sont en aval d'une constellation d'anciens chantiers. La résilience de ces secteurs est supposée être bien différente des petites masses d'eau étudiées dont le couvert forestier a été maintenu et où la durée d'exposition aux pollutions a été bien plus faible. Une étude en saison sèche, pourrait s'avérer également intéressante, les forts débits de saison des pluies ont pu contribuer à diluer l'impact des perturbations.

Analyse physicochimique :

Pour interpréter les volets biotiques, une étude de la physicochimie des cours d'eau a été réalisée par Hydreco. L'analyse du mercure s'est faite sur la colonne d'eau et non sur les sédiments.

Tableau 6: relevés physico-chimiques pris sur les 4 sites ORION

| | Site1 | Site2 | Site3 | Site4 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Carbone organique total (mg/L) | 0.5 | 0.53 | 0.51 | 0.84 |
| Azote total Kjeldahl (mg/L) | <0.5 | <0.5 | <0.5 | <0.5 |
| Azote ammoniacal (mg/L) | 0.01 | 0.01 | <0.01 | <0.01 |
| Phosphore total (mg/L) | 0.04 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| Mercure (µg/L) | 0.03 | <0.03 | <0.03 | <0.03 |
| Indices hydrocarbures (mg/L) | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 |

Les Sites 2, 3 et 4 ressortent en très bon état physico-chimique. Les données sont cohérentes avec ce qu'on pourrait attendre de têtes de bassin d'altitude. En revanche, le Site1 qui est le plus en aval et qui a le plus de cumul d'impact venant de l'amont ressort avec des taux en mercure aquatique légèrement supérieurs à la normal et également avec des taux de phosphore légèrement plus élevés.

Etude écotoxicologique des caïmans gris :

Un seul jeune caïman gris a pu être capturé lors des différentes missions. L'individu présentait un taux de mercure élevé.

Les analyses hormonales ont montré des anomalies au niveau de la réponse au stress.

Cela peut avoir une incidence sur le taux de survie des caïmans vis-à-vis des prédateurs. Le dysfonctionnement de cette hormone viendrait d'une atteinte du système endocrinien par le mercure. L'atteinte du système endocrinien pourrait également avoir des impacts sur les hormones sexuelles des caïmans et affecter la conservation de l'espèce au long terme.

La capture de ce caïman a contribué à la confirmation de l'hypothèse étant que le mercure affecte le système hormonal des caïmans. (Jérémy Lemaire et al. publication à venir).

Ces résultats sont très intéressants puisque cela permet de relativiser les résultats des autres volets aquatiques, malgré les bons résultats en termes de biodiversité sur le secteur de la DZ ORION.

6.2 Axe terrestre

6.2.a La faune terrestre

Les secteurs de la Réserve impactés par l'orpaillage n'ont jusque-là jamais pu être prospectés scientifiquement ou alors de manière anecdotique. La surface conséquente à parcourir et la difficulté d'accès rendent complexe et couteuse la mise en place d'inventaires et de suivis scientifiques pour évaluer les impacts sur la faune terrestre (amphibiens, mammifères, oiseaux).

L'une des majeures difficultés en Guyane pour l'analyse des suivis scientifiques est la faible probabilité de détection des espèces forestières ainsi que les biais observateurs qui sont très complexes à modéliser.

Pour maîtriser la variabilité des résultats et pouvoir établir des tendances, il est nécessaire d'avoir de nombreux réplicats temporels souvent incompatibles avec des milieux isolés.

Nous avons ainsi fait le choix de nous tourner vers des approches de biomonitoring (pièges photos et enregistreurs acoustiques) qui vont nous permettre d'avoir un maximum de réplicats spatiaux et temporels et ainsi minimiser les biais sur nos modélisations de tendances.

Les enregistreurs acoustiques et pièges photos ont été malheureusement livrés beaucoup trop tardivement pour être mis en place durant le projet.

Seuls 5 Audiomoths étaient à notre disposition durant le projet et ont été utilisés pour produire des données naturalistes sur les secteurs impactés.

Toutefois, les annotations manuelles ont permis de produire plus de 500 données sur une période de 20 jours de données.

Parmi les espèces intéressantes détectées sur les tests acoustiques que nous avons pu réaliser, nous avons :

- *Scinax proboscideus* (Déterminante ZNIEFF)
- *Ateles paniscus* (Déterminante ZNIEFF)
- *Spizaetus ornatus* (Espèce protégée)
- *Rhinella lescurei*....

L'objectif est à terme de développer des indicateurs de diversité acoustique ainsi que de développer des approches détections automatisées d'espèces à partir de sonogrammes. Les annotations manuelles réalisées dans le cadre de ce projet permettront d'alimenter la base de données de référence dans l'optique de développement d'approche automatisée. Ces approches sont à développer en partenariat avec la recherche scientifique.

6.2.b Ecotoxicologie des chauves-souris :

Les chauves-souris ont été identifiées comme pouvant être également de bons indicateurs de la bioaccumulation au mercure. (Moreno-Brush et al. 2018, Kumar et al. 2018, Portillo et al. 2023, Carrasco et al. 2020, Calao-Ramos et al. 2021...). Ce sont des tops prédateurs avec une durée de vie pouvant être conséquente. Le nombre de captures au filet peut permettre assez aisément d'établir des tendances statistiques de bioaccumulation comparées à d'autres top-prédateurs dont la capture est plus complexe.

Les espèces insectivores et piscivores semblent être de par leur nourriture les plus exposées à des taux de mercure très élevés.

Au total 27 individus ont pu être capturés avec prélèvements de poils. A défaut d'avoir les prélèvements sanguins permettant de connaître l'impact du mercure sur la santé des chauves-souris, nous aurons néanmoins une idée du taux de contamination qui pourra ultérieurement être mis en relation avec une correspondance en termes d'impact sur leur santé lors d'une éventuelle future campagne.

Des travaux de bibliographie restent encore à mener pour récupérer les seuils de tolérance au mercure par espèce.

Les individus les plus compatibles pour avoir des résultats robustes au vu de leur abondance sur le secteur sont *Rhinophylla pumilo* (frugivore) et *Carollia brevicauda/perspicillata* (insectivore/nectarivore).

L'ensemble des analyses de mercure a été réalisé par Jérémy Lemaire.

6.2.c La flore de ripisylve

Volet télédétection :

Le secteur Est de la Réserve a été couvert par du LiDAR aérien pour une surface de 43000 ha grâce à un financement Plan de Relance (2022). Au total, à partir des données des chantiers illégaux connus et la détection de barranques sous-couvert forestier, nous estimons la surface des chantiers d'orpaillage (légal et illégal) à environ 1 310 ha.

Cela représente un peu plus de 1 % de la surface de la Réserve des Nouragues, soit un peu plus de la moitié de la surface de Cayenne.

En revanche, rapporté à la surface estimée de la ripisylve de la moitié Est de la Réserve, 15% de la surface en ripisylve présente des impacts au sol.

Pour faire cette estimation, la surface de ripisylve a été calculée en créant une zone tampon de 25m autour du réseau hydrographique. La ripisylve est plus ou moins large en fonction de plusieurs paramètres qui sont en général complexes à estimer. Dans le cadre de l'orpaillage alluvionnaire les chantiers sont en général proches du lit mineur, une validation manuelle a permis de mettre en évidence qu'un tampon de 25m englobait la majorité des impacts alluvionnaires.

Les impacts du sous-bois sont nombreux mais difficiles à quantifier (présences de très nombreux layons, défriches liées aux camps, pistes à quads...). Au LiDAR, plus de 47 km de piste à quad ont pu être détectés par traitement manuel, les layons clandestins les plus récents ont pu être détectés mais la détection n'est pas suffisamment fine pour faire une estimation de la surface du réseau de layons. Il est néanmoins difficile d'estimer la proportion encore carrossable et la reprise de la végétation au sol sur ces anciennes pistes. Même si la défriche de ces zones n'impacte pas la structure de la canopée, le fort tassement du sol sur ces zones freine la reprise de la végétation de sous-bois.

Grâce au Modèle Numérique de Terrain produit à partir des données LiDAR, ainsi qu'aux données issus de la LCOI, nous avons pu dresser un polygone englobant les secteurs ayant présentés des chantiers d'orpaillage illégal au sein de la Réserve, en nous basant sur la présence ou non de barranque sur le linéaire de cours d'eau. Le réseau de barranques produit est très cohérent avec les données produites par l'Unité Spécialisée Nature de l'ONF, ce qui à la fois montre l'efficacité des actions de surveillance réalisées et la très bonne complétion des deux méthodes. En effet, les actions de surveillance permettent de dater les impacts, le LiDAR permet de placer précisément les impacts et de faire une estimation du degré d'impacts en partant du postulat que plus une barranque est large et profonde, plus l'intensité d'impact a été fort.

La Fig. 27 montre qu'il y'a effectivement une différence sur la médiane des hauteurs de ripisylve entre présence et absence d'impact au sol. On peut également constater qu'il y'a une proportion de ripisylve très basse (< 5m) bien plus élevée sur les secteurs anciennement impactés.

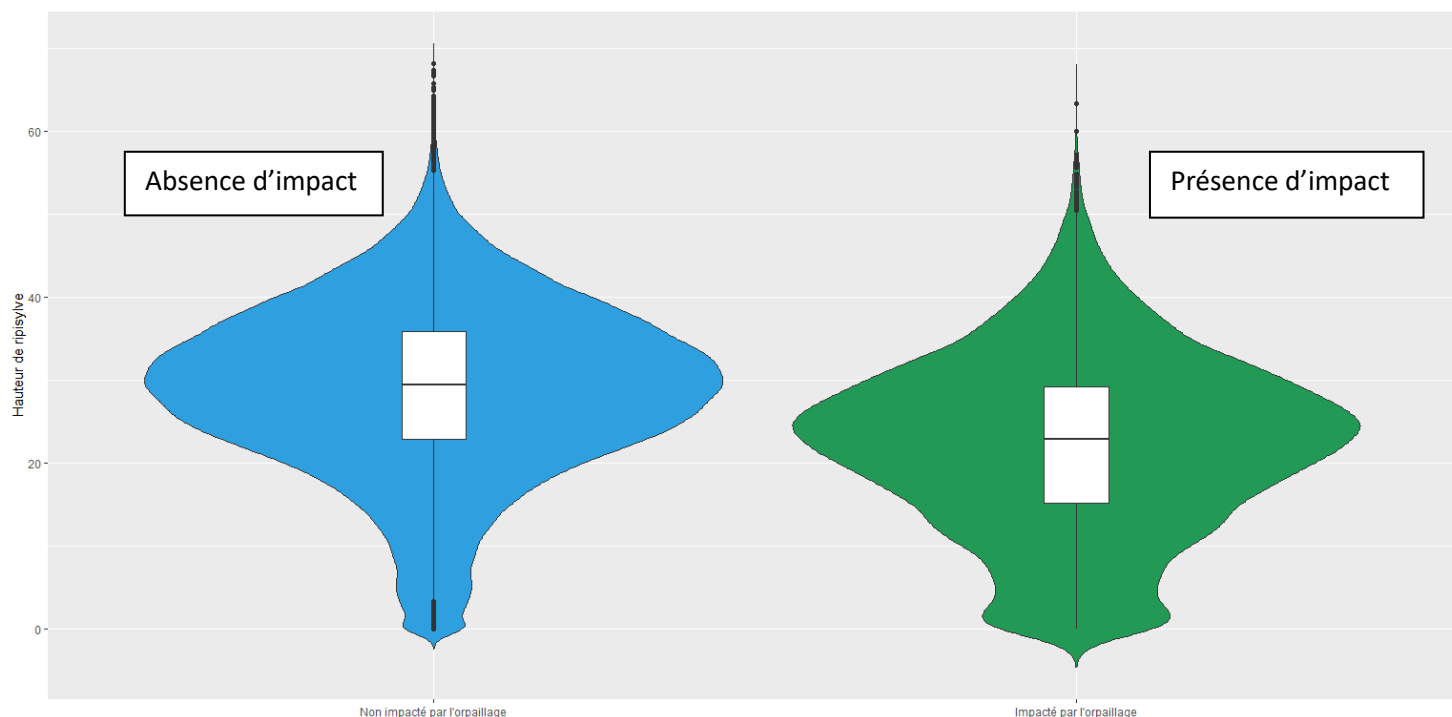


Figure 27 : Hauteur de canopée de la ripisylve en fonction de la présence ou non d'anciens impacts liés à l'orpaillage illégal

Il est possible que la hauteur de canopée ne soit pas l'indicateur le plus pertinent/fin pour vraiment se représenter l'impact. Il serait intéressant de tester d'autres indicateurs comme la répartition spatiale de trouées dans la canopée ou la porosité de la canopée qui n'ont pas encore été investigués à ce stade.

Une partie du survol LiDAR aérien de 2022 recouvre une acquisition réalisée par l'ONF sur le secteur Bélizon en 2019. A l'avenir, pour mieux intégrer les aspects temporels sur les impacts de l'orpaillage, il serait intéressant d'utiliser ces données pour comparer la structure de canopée et le réseau hydrographique des zones impactées pour voir l'évolution sur 3 ans.

En prenant en compte le fait que les orpailleurs clandestins travaillent de plus en plus maintenant le couvert forestier pour ne pas être repéré, exploiter uniquement des modèles de canopée peut également amener à sous-estimer les impacts en sous-bois. En effet, il va être difficile de détecter les camps logistiques où il y'a eu des impacts sur le sous-bois, qui ne présentent aucune altération de la topographie particulière contrairement aux chantiers.

Il serait intéressant de travailler sur les indicateurs de type profil de densité de végétation pour caractériser les impacts. En effet, les données LiDAR peuvent être utilisées pour estimer la densité de végétation, notamment à partir de l'équation de Beer-Lambert et du coefficient d'extinction lumineuse. Il existe une relation selon laquelle moins il y a de faisceaux lumineux qui atteignent le soleil, plus la végétation est dense. Malheureusement, la physique du capteur et du signal induit en général des biais dans le calcul de densité de végétation, notamment avec une forte surestimation de densité du sous-bois (Vincent et al. 2023). Il est néanmoins possible de pouvoir corriger cette estimation en corrigeant mathématiquement le biais par rapport à des valeurs de référence. A ce titre, nous avons pu scanner au LiDAR terrestre certains secteurs impactés/non impactés en même temps que l'acquisition aéroportée, grâce à un prêt du CNRS Guyane. Le LiDAR terrestre permet en effet une mesure fine de la densité du sous-bois, il a néanmoins pour limite d'être complexe à être mis en place et est très chronophage sur les étapes de co-registation entre les différents scans.



Exemples de données LiDAR terrestre avec à gauche une zone de campement, et en dessous une zone de chantier avec barranques au centre du transect. Sur les deux transects, on voit que le couvert forestier est maintenu, mais que la flore de sous-bois est absente des zones d'activité ou que la densité est très faible.



Figure 28 : Coupes de données LiDAR terrestre sur un chantier et campement clandestin

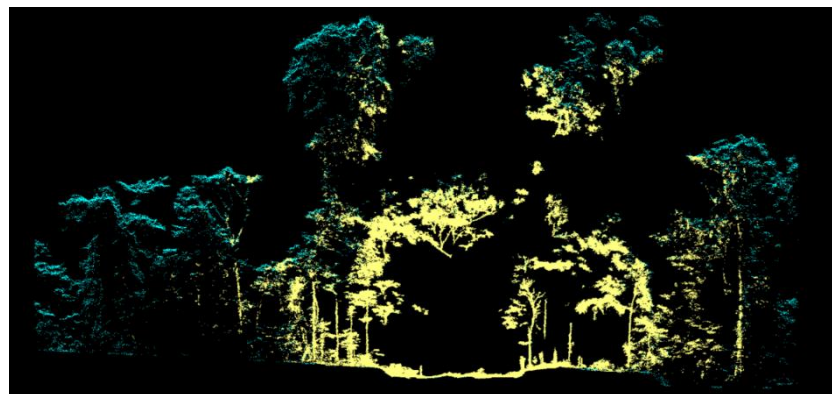
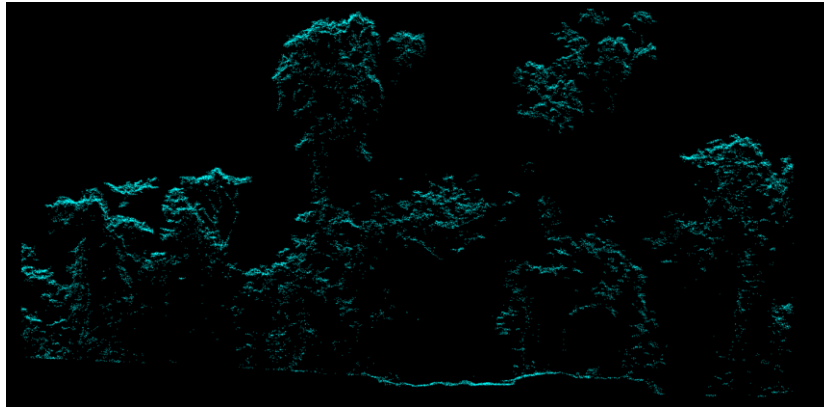


Figure 29 : Coupes transversales d'un nuage de points LiDAR sur une zone de chantier d'orpaillage illégal. En bleu, les données provenant de LiDAR aérien, en jaune de LiDAR terrestre

Les acquisitions LiDAR terrestre pourront à terme servir de référence pour la calibration des profils de densité de végétation. Ces profils pourraient éventuellement servir pour détecter des anomalies en termes de densité de végétation au sol. Une longue phase de recherche et développement par les différents organismes de recherche experts en cette thématique reste encore à mener.

Volet inventaire botanique

Un inventaire des plantes de sous-bois et des arbres a été réalisé dans le cadre de ce projet autour de la DZ ORION.

A l'origine, le secteur cible pour la réalisation de ce taxon était plus en aval, sur des zones où on détecte une forte altération du couvert sur des images satellites. Pour des raisons logistiques, le secteur de l'étude a été fait comme pour les autres taxons sur la DZ ORION malgré des impacts sur la végétation qui nous paraissaient bien plus diffus (maintien de l'intégralité du couvert forestier et impacts locaux sur la flore de sous-bois).

Nous avons une visibilité relativement faible de la flore présente et une représentation limitée des impacts que l'on pouvait trouver sur la flore à proximité des chantiers.

Il n'a finalement pas été possible de définir un protocole avec les experts permettant de faire un diagnostic. Il aurait fallu à l'avance connaître la taille des ripisylves à prendre en compte pour une zone d'étude, comparer différentes ripisylves impactées vs non impactées. Il aurait également fallu comparer des typologies de ripisylve similaires, malheureusement il n'existe pas à ce jour en Guyane de typologie de ripisylve bien établie.

Il nous faudrait estimer la surface nécessaire de parcelles pour comparer 2 secteurs et définir des indicateurs pertinents.

Le choix des indicateurs à suivre est également à ce jour très flou (Nombre d'espèces/ha, % d'espèces ubiquistes, suivi dendrométrique, focus plutôt sur des plantes de sous-bois ou plutôt les arbres ?)

Le temps de prospection disponible n'était également pas compatible avec des surfaces suffisamment grandes pour avoir des résultats statistiques probants.

Nous avons néanmoins pu bénéficier de données d'expertise sur de nombreux sites jamais prospectés qui nous permettent d'avoir une meilleure compréhension de la flore du secteur et pu échanger avec les experts pour réfléchir à différents protocoles pouvant être mis en place à l'avenir.

Deux types de géomorphologie/Habitats ont été rencontrés :

- **Forêts de collines larges et très élevées sur sol de type volcanisme basique avec des zones d'affleurements latéritiques (Secteur de la piste à quad au Nord de la DZ ORION)**
- **Forêts de montagnes et très grandes collines sur volcanite, volcano-sédiments et sédiments indifférenciés (autres sites)**

Parmi les sites prospectés, une falaise et une cascade présentaient un fasciés très intéressant par leur rareté en Guyane.

Au total, 586 données inventoriées pour 387 espèces ont été produites dont 22 espèces déterminantes ZNIEFF et 1 espèce protégée (*Goeppertia dilabens*).

VII. Conclusions et perspectives

Nous avons pu constater à travers les missions de terrain financées sur ce projet qu'il y a plus de cours d'eau qui ont connu une exploitation aurifère récente ou passé que ce que l'on pensait. L'analyse des données LiDAR aérien de 2022 va également dans ce sens.

L'organisation de ces missions a pu être simplifiée d'un point de vue logistique grâce aux créations des drops zones pour les besoins de la lutte contre l'orpaillage illégal qui ont facilité l'accès aux secteurs impactés. Néanmoins, le coût financier et logistique des missions sur ces secteurs doit être pris en compte pour pérenniser nos actions de veille sur l'état écologique de la faune et la flore du secteur. Il est donc important pour nous de garder les indicateurs les plus adaptés et les plus simples à mettre en œuvre.

Le choix d'avoir principalement porté nos actions sur les poissons pour la partie aquatique repose sur le fait qu'une liste rouge IUCN régionale existante et qu'une liste d'espèces protégées est prévue pour un futur proche. Cela va nous permettre de mieux prioriser nos actions de gestion en fonction des espèces rencontrées.

Les secteurs proches de la DZ ORION étudiés via l'inventaire pêche électrique et invertébrés aquatiques font état d'un bilan global de bon voire très bon état écologique. Plusieurs facteurs ont probablement permis la résilience de ces milieux. Les impacts sont relativement très récents (moins de 2 ans) et la durée d'exploitation a été courte selon les données de l'Unité Spéciale Nature de l'ONF. La campagne de harcèlement/destruction pilotée par l'USN a freiné considérablement l'expansion de ces chantiers et empêché qu'il y ait une activité trop intense et sur la durée. Ces campagnes de surveillance et d'intervention LCOI ont également forcé les orpailleurs illégaux à travailler sous couvert forestier pour ne pas être détectés, ce qui a permis un maintien d'apport en litière et de la température qui a dû aider sur la résilience de la physicochimie de ces cours d'eau. De plus, une portion en amont est restée intacte et a probablement permis de servir de zone refuge pour les espèces spécialistes. Il est à noter également que le lit mineur a été relativement peu impacté, le gros des impacts sont des barranques en bordure sur le lit majeur qui déversent encore des pollutions lors des grosses pluies.

On peut néanmoins nuancer les résultats avec le taux de contamination au mercure du caïman et des chiroptères qui est élevé et qui peut occasionner des impacts sur les communautés sur le long terme.

Lorsque l'on regarde les résultats ADNe sur les analyses fonctionnelles du cortège ichtyologique, en couplant avec une interprétation LiDAR, on constate que certains sites ont eu une bascule fonctionnelle très importante avec une perte d'espèces spécialistes. Nous manquons à ce jour de maîtrise sur les paramètres précis qui ont permis une résilience sur certains sites impactés et pas sur d'autres (durée d'exploitation, intensité des impacts, hydrogéomorphologie plus vulnérables que d'autres...).

Il serait intéressant à l'avenir d'avoir une étude plus poussée sur ces secteurs où l'on a observé une modification fonctionnelle et une perte d'espèces spécialistes, pour mieux comprendre les facteurs qui ont fait que certains secteurs arrivent à ressortir en état très bon écologique alors que d'autres ressortent avec une perte du cortège d'espèces spécialistes.

Un suivi au long terme de ces sites, pour voir si des espèces spécialistes se réinstallent sur le long terme pourrait également être intéressant à envisager.

Cette étude a ciblé de très petites masses d'eau qui ressortent comme étant à fort enjeu de conservation. Il est fort probable que les secteurs plus en aval, plus larges, ont subi une durée d'exposition aux pollutions plus longue liée aux nombres de chantiers actifs en amont. La taille des flats étant plus grande, la taille des chantiers sur ces masses d'eau est souvent plus importante et engendre une déforestation de la ripisylve beaucoup plus conséquente. Ces

secteurs sont également moins encaissés et donc plus faciles pour les orpailleurs illégaux à atteindre d'un point de vue logistique. Les données de l'USN montrent d'ailleurs qu'en général ce sont les sites avec le plus de réactivation.

Le cortège d'espèces présentes dans ces habitats et les impacts étant différents, il serait intéressant d'évaluer la résilience de ces masses d'eau plus importantes.

La campagne de pêche à l'électricité, nous a permis d'avoir accès à l'abondance et la biométrie des espèces. Elle nous a permis d'apporter des éléments importants concernant l'écologie d'*Harttiella longicauda* et de confirmer que nos listes ADNe étaient cohérentes. L'estimation d'abondance protocolée de la pêche électrique a servi de calibration dans le cadre d'un partenariat de recherche (Aquasound) qui cherche à tester de nouvelles approches ADNe pour estimer les abondances relatives des espèces de poissons. Si cette nouvelle approche fonctionne, elle pourra être testée sur d'autres sites à l'avenir pour détecter des modifications d'assemblages plus fines que de la présence/absence.

Il est à noter que le poids et le volume du matériel de pêche à l'électricité restreint fortement le nombre de cours d'eau pouvant être prospectés avec cette méthode.

Concernant la flore, sur le terrain proche de la DZ ORION, il nous a été difficile de mettre en place un protocole permettant de comparer des ripisylves impactées vs non impactées. Le secteur de la DZ ORION est néanmoins très peu déforesté, notamment pour que les chantiers et les camps ne soient pas détectés lors des missions de surveillance, mais aussi parce que la petite taille des cours d'eau restreint la surface pouvant être travaillée par l'orpaillage alluvionnaire. Au regard de la forte concentration des impacts sur les ripisylves, il serait intéressant qu'à l'échelle régionale des travaux soient menés sur l'établissement d'une typologie des ripisylves et pour mieux caractériser des marqueurs de secondarisation. Cette flore est également lourdement impactée par l'activité des concessions légales et il est nécessaire d'avoir une stratégie régionale pour alimenter les discussions sur les listes rouges régionales et révision des espèces protégées à venir. A ce stade, il reste préférable de rester à des échelles macroscopiques et d'utiliser des suivis télédétections pour observer l'évolution de la ripisylve au cours du temps qui aboutissent plus facilement à des résultats sur nos enjeux de gestion à l'échelle de la Réserve.

Il nous paraît également indispensable de rappeler que sans le fonctionnement pérenne de la lutte contre l'orpaillage illégal, il ne nous sera pas possible de pouvoir circuler pour des raisons de sécurité sur ces secteurs et de suivre l'écologie des cours d'eau sur le long terme. Au regard de la surface impactée et de la difficulté d'accès, la Réserve ne pourra jamais se lancer sur des programmes de réhabilitation des sites dont l'estimation des coûts représentent plusieurs dizaines de millions d'euros. De plus, les protocoles de réhabilitation sont encore à leurs balbutiements et peuvent parfois causer beaucoup d'impacts. Il est donc essentiel d'opter pour une stratégie d'évitement des impacts à tout prix, à défaut de savoir les réhabiliter pour le moment. L'acquisition de données LiDAR a été également d'une aide précieuse pour l'interprétation des résultats et sur les futurs choix des sites. Il serait intéressant de prévoir à l'avenir une acquisition plus restreinte pour observer les changements au fil du temps (modification de la ripisylve, apparition de nouvelles pistes/chantiers...).

Il nous faudrait également fédérer les milieux de la recherche pour poursuivre dans la dynamique d'études des impacts de l'orpaillage illégal sur les différentes facettes de la biodiversité. Les sites proches de la DZ ORION font partis des sites impactés les mieux étudiés de Guyane et peuvent constituer un formidable laboratoire.

Il serait intéressant de suivre en saison sèche au long terme 6 masses d'eau impactées pour que cela puisse être pérenne financièrement. Deux petites masses d'eau (ORION5 et ORION7) qui ont fortement perdu en fonctionnalité par rapport aux cours d'eau voisins, deux moyennes masses d'eau (Mazin Ouest et Mazin Est) plus en aval qui ont subi une temporalité d'impact plus conséquente et des déforestations plus conséquentes, deux sites sur des grosses masses d'eau encore plus en aval avec des impacts encore plus prononcés (Rivière Blanc).

Une étude est à envisager sur le long terme sur les 6 sites proposés ci-dessus en faisant une description systématique de l'habitat (protocole type Carhyce), de la physico-chimie de terrain avec différentes sondes (pH, turbidité, conductivité, température, % O2 dissous), une campagne ADNe, un inventaire des invertébrés aquatiques. Un inventaire ichtyologique pour servir d'état de référence et calibrer les résultats ADNe serait à prévoir également lors de la première phase du suivi.

En revanche, une des limites dans le choix de ces sites est que pour les besoins LCOI, les Drop zones (Mazin Est et Ouest) sont maintenues déforestées en bordure de cours d'eau, ce qui pourrait affecter négativement les résultats de résilience et biaiser certaines conclusions concernant la résilience des impacts de l'orpaillage.

En conclusion et perspectives d'actions, nous proposons ci-dessous un bilan ORION 2022-2023 et des perspectives d'actions synthétisées :

Tableau 7: Tableau de conclusion d'ORION et perspectives

| Axe d'étude | Objectifs ORION 2022-2023 | Résultats principaux et analyse des manques | Actions scientifiques à envisager idéalement (à soumettre au CSRPN, CCG et DGTM) | Priorité |
|-------------|---|--|---|----------|
| Aquatique | Etude des communautés de poissons (par ADNe et inventaire par pêche à l'électricité) | Les communautés de poissons et macro-invertébrées sur des têtes de bassin, qui ont été impactées sur un pas de temps faible avec maintien du couvert forestier, sont résilientes. Une perte de fonctionnalité ichtyologique est néanmoins observée sur les sites les plus impactés. | Mettre en place un suivi temporel (1/an en saison sèche) des communautés de poissons et de macro-invertébrés, avec un gradient d'impact, sur 6 masses d'eau : - 2 petites masses d'eau où le projet ORION a identifié des pertes de fonctionnalité des communautés de poissons et qui auraient été impactés sur un relatif long linéaire de cours d'eau (sites ORION 5 et 7) - 2 moyennes masses d'eau plus impactées et plus en aval que le secteur ORION (les sites Mazin-Est et Ouest sont à cibler) - 2 grandes masses d'eau impactées par des méthodes industrielles (site Blanc à cibler) A noter que : - le nombre de 6 masses d'eau représente un nombre de reliquats suffisant pour établir des analyses pertinentes, et les secteurs plus en aval que le secteur ORION permet d'inclure la notion de chronicité - en termes de méthode, un suivi par inventaire ADNe serait assez robuste pour les poissons et serait logistiquement envisageable sur une mission hélicoptérée en une ou deux journées. - reste encore à la recherche scientifique de confirmer la robustesse de la méthode ADNe pour les macro-invertébrés - il faudrait dans tous les cas coupler avec des inventaires naturalistes faits par des experts, au moins une fois sur chaque site, pour vérifier la concordance des résultats ADNe | 1 |
| | Etude des communautés d'invertébrés aquatiques (par inventaire naturaliste) | Une bonne étude spatiale a pu être menée pour les poissons mais pas pour les macro-invertébrés (que 4 sites peu impactés et très en amont de têtes de criques). Nous manquons cependant de : suivi temporel pour voir l'évolution de la structure des communautés au fil des années. de gradient d'impact | | |
| | Etude des diatomées | Non réalisée lors du projet ORION. Les discussions sur le protocole et sa pertinence vis-à-vis des sites de la RN à suivre doivent encore être menées. | A ce stade, discussion à continuer avec les experts | 3 |
| | Physicochimie de l'eau | La physicochimie des 4 sites ORION étudiés indique un bon état écologique. Pour les autres sites étudiés par prélèvement ADNe, seule la turbidité a été relevée. En discussion avec les experts, le colmatage serait à étudier en complément de la turbidité. | Réaliser des mesures systématiques avec une sonde multiparamétrique, à chaque point de suivi temporel précédemment cité. Suivre les recherches sur la pertinence d'un suivi de colmatage. Une thèse est en cours avec l'Office de l'Eau (OEG). La RN a acté d'un partenariat avec l'OEG et une station hydrosédimentaire a été mise en place sur le secteur ORION en janvier 2024. | 2 |

| Axe d'étude | Objectifs ORION 2022-2023 | Résultats principaux et analyse des manques | Actions scientifiques à envisager idéalement (à soumettre au CSRPN, CCG et DGTM) | Priorité |
|-------------|---|---|--|----------|
| Terrestre | Géologie | Non réalisée lors du projet ORION. Il est difficile de réaliser des suivis écologiques sur des secteurs orpaillés sans associer une réflexion géologique ou pédologique. Cependant, il serait nécessaire d'affiner la question scientifique à poser. | A ce stade, discussion à continuer avec les experts | 3 |
| | Etude de la faune terrestre (par pièges photos et enregistreurs audio) | Non réalisée lors du projet ORION pour raison logistique. Tests acoustiques réalisés probants. Les protocoles sont à affiner avec l'appui ou en lien avec les experts. | Finaliser le calibrage des protocoles et envisager leur mise en œuvre sur les sites précédemment cités. Développer les collaborations avec la recherche pour l'analyse des données (laboratoire LECA, projet ORCHAMP ; OFB...) | 2 |
| | Etude botanique (inventaire naturaliste) | La partie botanique de terrain reste à calibrer pour dégager des indicateurs (il manque à ce jour de la littérature sur des typologies de ripisylve). | Complexité d'études naturalistes botaniques dans l'objectif d'ORION. S'orienter vers de la télédétection à l'échelle macroscopique semble à ce stade plus adapté. Plus globalement, il y a un enjeu de connaissance botanique des ripisylves | 3 |
| Transversal | Cartographie des impacts sur les habitats aquatiques et forestiers (par LiDAR) | Etude prioritaire servant à la fois d'indicateurs de pression/impact et indicateur d'état. Habitats aquatiques : La connaissance des cours d'eau a pu être affinée par télédétection : tailles de lit mineur, sinuosité et pente des cours d'eau qui ont pu être calculés. De nombreuses barranques ont pu être détectées via le LiDAR. Habitats forestiers : Grâce aux données LiDAR, l'estimation de la surface déforestée a pu être affinée ainsi que l'estimation des surfaces travaillées au sol à partir de la détection de barranques. Des résultats intéressants sont ressortis sur les hauteurs de ripisylve différentes selon la présence de chantiers d'orpaillage. | A l'échelle terrain, affiner la caractérisation des cours d'eau de la RN afin de mieux connaître la singularité des habitats et travailler sur les priorités de conservation. Pour ce faire, réaliser systématiquement une description cartographique (adaptation du protocole CARHYCE), à chaque point de suivi temporel précédemment cité, et sur tout autre cours d'eau traversé. A l'échelle macroscopique : réaliser des suivis temporels photogrammétriques (par drone) du couvert forestier sur les secteurs très impactés (Mazin-Est, Ouest, Blanc) réaliser une étude comparative test de 2 couvertures LiDAR 2019 (via ONF, bordure RN) et celle de la RN (2022) pour étudier l'évolution des impacts de l'orpaillage réaliser une étude cartographique d'évolution des impacts (par LiDAR) tous les 5 ans sur une zone à définir selon les enjeux réaliser une étude d'investigation historique sur les impacts de l'orpaillage depuis la ruée vers l'or en Guyane dans les secteurs « Nouragues » | 1 |
| | Ecotoxicologie | Le seul caïman gris capturé présente des taux de contamination élevé au mercure et une altération de son système hormonal. Certains chiroptères capturés présentaient des taux de contamination au mercure élevé | Développer le partenariat avec la recherche scientifique pour comprendre et suivre les taux de contamination au mercure et son impact sur l'écologie des espèces animales de la RN | 2 |

Au regard des études scientifiques idéales à mener dans la continuité du projet ORION, l'équipe de la Réserve propose le plan d'actions suivant, selon que cela relève de la compétence RN ou d'un appui extérieur (partenariat à développer). La composante financière est également cruciale à prendre en compte. Le tableau ci-dessous envisage donc :

- un plan d'action réalisable sur dotation actuelle de la RN,
- un plan d'action réalisable sur dotation annuelle de la RN avec le complément budgétaire dédié à la LCOI
- un plan d'action à envisager sur projet financier dédié
- un plan d'action relevant d'un partenariat spécifique et/ou de l'appui d'un projet de recherche dédié

En tout état de cause, cette stratégie « ORION » devra être également réfléchie conjointement à la révision du plan de gestion (en cours) puis actée, avec l'avis du CSRPN, du Comité consultatif de gestion (CCG) et de la DGTM, au regard de l'ensemble de la stratégie de la RN et de sa réalité financière et humaine. Une stratégie scientifique RN Nouragues globale, intégrant ORION, devrait être proposée aux décideurs d'ici le début d'année 2025, pour être discutée puis validée par le CSRPN et le CCG de la RN.

Tableau 8: Proposition de perspectives d'actions « ORION » au regard de la faisabilité financière et technique de la RN

| Echelle d'étude | Etudes scientifiques ORION envisagées | Budget associé (estimation) | Echéancier | Faisabilité gestionnaires RN (de portage et financière) |
|---|--|---|--|--|
| Cœur des objectifs gestionnaires RN dans cadre ORION (indicateurs état enjeux conservation) | Mettre en place un suivi temporel ADNé (1/an en saison sèche) des communautés de poissons et de macro-invertébrés , avec un gradient d'impact, sur 6 masses d'eau (avec suivi physico-chimique par sonde multiparamétrique) | 2 journées hélicoptées sauts de puce entre 6 sites ciblés pour prélèvement ADNé (env. 4700 €/j) soit 9 400€ Achat matériel (12 kits) et analyse ADNé incluant frais de port et douane 7 500 € Entretien des DZ 6 sites (3/an) – condition de réussite logistique de la mission ! soit 14 100 € → total 31 k€ | 1 fois/an dès 2024 (en profitant du budget LCOI 2024) | Equipe RN sur dotation annuelle classique au détriment d'un suivi scientifique et des chantiers nature MFR (ex : IKA = 2 000 € pirogues ; 2 chantiers MFR = 6 800 € de pirogues) Ou Equipe RN (dotation annuelle intégrant LCOI-RN) |
| | Réaliser des inventaires naturalistes poissons et macro-invertébrés (IA) une fois sur chacun des 6 sites | Prestations IA sur 2j sans logistique nuitée (3h/site) = 10 k€ Prestation ichtyo (non électrique) = 10 k€ Coût 2j hélico = 9 400€ → total 30 k€ | 1 fois en début de projet (2025 ou 2026) | Equipe RN avec experts sur projet dédié |
| | Suivre la faune terrestre en finalisant le calibrage des protocoles par pièges photos et enregistreurs audios | Achat pièges photos et audiomoths : 0 € jusqu'à 2026 (38 pièges photos et 50 audiomoths achetés en 2023) Piles à prévoir : 2 500 €/an (taxes incluses) Mission à coupler logistiquement avec mission prioritaire précédemment citée : 0 € | 1 fois/an dès 2024 | A mutualiser sur autres missions |
| | Caractériser les cours d'eau de la RN | 0 € (monter en compétences pour équipe RN, mutualisation autres missions) | 1 fois en début de projet (2025 ou 2026) ou dès qu'il y a changement | A mutualiser sur autres missions |
| | Réaliser des suivis temporels photogrammétriques (par drone) du couvert forestier sur les secteurs très impactés (Mazin-Est, Ouest, Blanc) | Prêt de drone (CNRS, CENG, GEPOG ou ONF ?) avec pilote = 0 € ou achat + formation agents RN (coût à définir) Analyse en interne RN (logiciel sous licence pour obtenir orthophoto) ou convention partenariale à faire (CNRS ou RDI/USN-ONF ?) | 1 acquisition/an | A mutualiser sur autres missions |
| | Réaliser une étude cartographique d'évolution des impacts (par LiDAR) tous les 5 ans sur une zone à définir selon les enjeux | Couverture LiDAR à faire sur secteurs bien définis, environ 35 k€ | 1 fois/5 ans | Equipe RN avec experts sur projet dédié |
| | Réaliser une étude d'investigation historique sur les impacts de l'orpaillage depuis la ruée vers l'or en Guyane dans les secteurs « Nouragues » | Stage en cartographie historique, niveau M2 (partenariat CTG/Maison des cultures et des mémoires de Guyane) env. 3 600 € | 1 fois | Equipe RN sur dotation annuelle classique ou sur projet financier dédié |
| | Réfléchir à la pertinence de réhabilitation de certains sites | A définir, intégration RN dans les projets type RHYSOG | En continu | Partenariats RN avec projets en cours (RHYSOG, PAG, ONF) |

| Echelle d'étude | Etudes scientifiques ORION envisagées | Budget associé (estimation) | Echéancier | Faisabilité gestionnaires RN (de portage et financière) |
|---|--|-----------------------------|------------|--|
| Appui de la recherche sur méthodologie de suivis | Suivre et appuyer la thèse sur le colmatage (Station hydrosédimentaire) | A définir | A définir | Partenariats RN avec projets de recherche en cours via la thèse de Michaël Bianchi (2023-2025) avec l'OEG |
| | Développer les indicateurs ADNe et bioacoustiques | A définir | A définir | Partenariats RN avec projets de recherche en cours AQUASOUND (Jérôme Muriennne, Camille Desjonquères, Céline Condachou) et DARKSOUND/MONITOR (Jérôme Sueur, Sylvain Haupt) |
| | Développer les protocoles de suivis de tête de bassin | A définir | A définir | Partenariats RN avec projet TBV de l'OFB (Gabriel Melun) |
| Appui de la recherche : observatoire écologique pour comprendre la dynamique environnementale | Développer le partenariat avec la recherche scientifique pour comprendre et suivre les taux de contamination au mercure et son impact sur l'écologie des espèces animales de la RN | A définir | A définir | Partenariats RN avec projets de recherche en cours et à développer PALEOPROJECT (écotoxicologie sur les caïmans), projet de Bibiana Rojas sur les amphibiens. |
| | Développer l'attractivité scientifique internationale sur le secteur d'ORION (géologie/pédologie, hydromorphologie, orpaillage, télédétection...) | A définir | A définir | Communication scientifique à déployer ! |

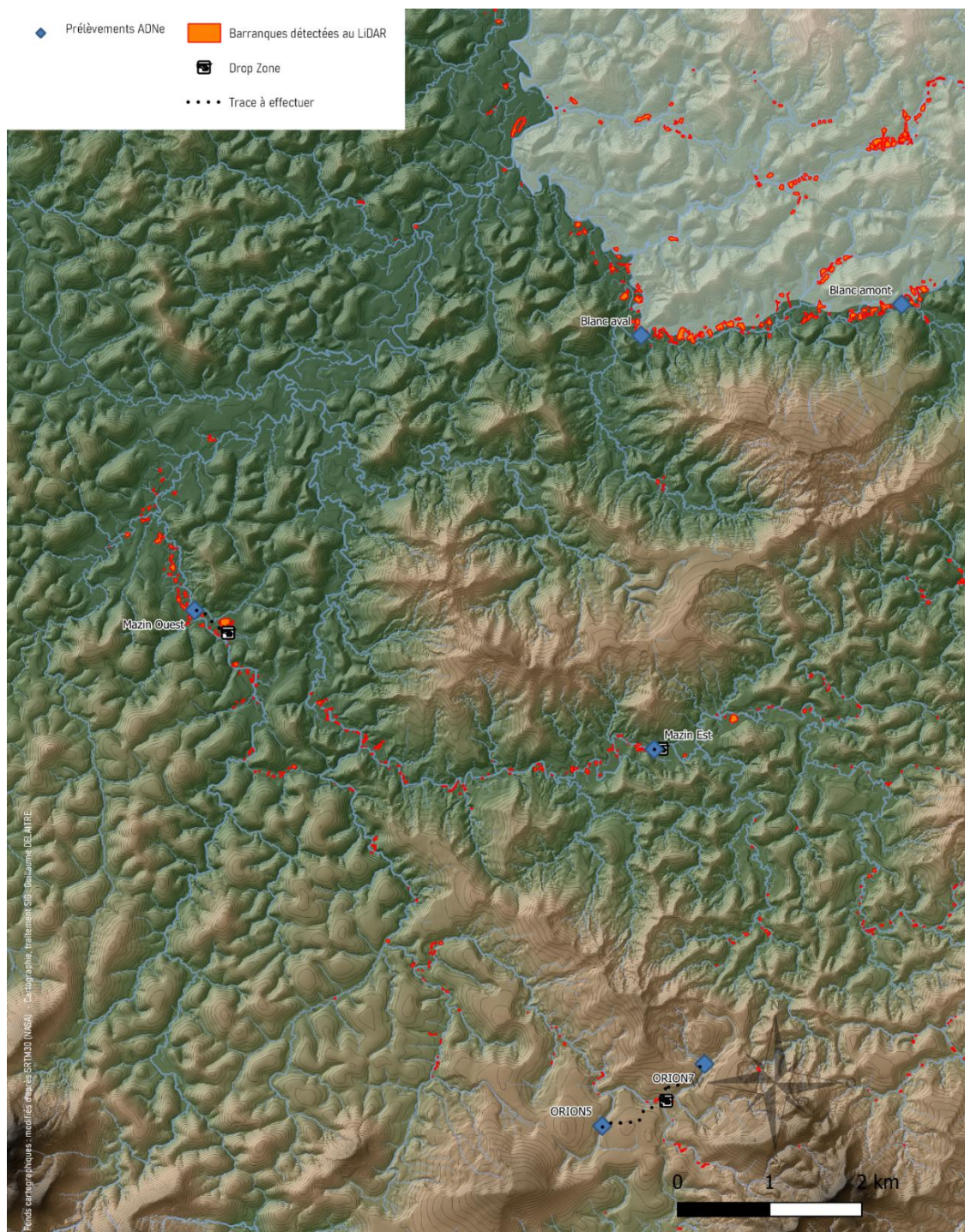


Figure 30 : Proposition du futur plan d'échantillonnage à suivre sur le long terme

VIII. Bibliographie

- Allard et al. 2016, Effect of reduced impact logging and small-scale mining disturbances on Neotropical stream fish assemblages
 - Aslam et al. 2017, Chromium toxicity in fish : A review article
 - Baselga 2010, Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity.
 - Benone et al. 2020, Unravelling patterns of taxonomic and functional diversity of Amazon stream fish
 - Beyersmann et al. 2008, Carcinogenic metal compounds : recent insight into molecular and cellular mechanisms
 - Brosse et al. 2011, Small-scale gold mining erodes fish assemblage structure in small neotropical streams
 - Brown et al. 2010, Dendritic network structure constrains metacommunity properties in riverine ecosystems
 - Cantera et al. 2019, Optimizing environmental DNA sampling effort for fish inventories in tropical streams and rivers
 - Cantera 2019, Anthropization effects on freshwater fish communities in French Guiana : An environmental DNA approach
 - Cantera et al. 2022, Low level of anthropization linked to harsh vertebrate biodiversity decline in Amazonia
 - Cantera et al. 2022, Characterizing the spatial signal of environmental DNA in river systems using a community ecology approach
 - Calao-Ramos et al. 2021, Bats are an excellent sentinel model for the detection of genotoxic agents. Study in a Colombian Caribbean region
 - Carrasco-Rueda et al. 2020, Mercury bioaccumulation in tropical bats from a region of active artisanal and small-scale gold mining
 - Castello et al. 2013, The vulnerability of Amazon freshwater ecosystems
 - Castello et al. 2016, Large-scale degradation of Amazonian
 - Cavanagh et al. 2014, Effects of suspended sediment on freshwater fish
 - Cilleros et al. 2019, Unlocking biodiversity and conservation studies in high-diversity environments using environmental DNA (eDNA) : A test with Guianese freshwater fishes
 - Coutant et al. 2020, Amazonian mammal monitoring using aquatic environmental DNA
 - Coutant et al. 2021, Detecting fish assemblages with environmental DNA : Does protocol matter ? Testing eDNA metabarcoding method robustness
 - Coutant et al. 2023, Environmental DNA reveals a mismatch between diversity facets of Amazonian fishes in response to contrasting geographical, environmental and anthropogenic effects
 - Evans et al. 2019, Assessing arrays of multiple trail cameras to detect North American mammals
 - Fitzgibbon et al. 2020, The interaction between water turbidity and visual sensory systems and its impact on freshwater fishes
 - Gomes et al. 2022, Influence of Anthropogenic Sounds on Insect, Anuran and Bird Acoustic Signals : A Meta-Analysis
 - Kays et al. 2020, An empirical evaluation of camera trap study design : How many, how long and when ?
 - Kolowski et al. 2021, High-density camera trap grid reveals lack of consistency in detection and capture rates across space and time
 - Lague et al. 2014, The stream power river incision model/ Evidence, theory and beyond
 - Lemaire et al. 2021, I got it from my mother : Inter-nest variation of mercury concentration in neonate Smooth-fronted Caiman suggests maternal transfer and possible phenotypical effects
 - Lemaire et al. 2021, Lead, Mercury and selenium alter physiological functions in wild caimans (*Caiman crocodilus*)
 - Lopez-Delgado et al. 2020, Local environmental factors influence beta-diversity patterns of tropical fish assemblages more than spatial factors
 - J.Lyons et al. 2015, Bank erosion of legacy sediment at the transition from vertical to lateral stream incision
 - Moreno-Brush et al. 2018, Mercury concentrations in bats (*Chiroptera*) from a gold mining area in the Peruvian Amazon
 - Murienne et al. 2019, Aquatic eDNA for monitoring French Guiana biodiversity
 - O'Connor et al. 2017, Camera trap arrays improve detection probability of wildlife : investigating study design considerations using an empirical dataset.
 - Olsson PE et al. 1998, Mechanisms of heavy metal accumulation and toxicity in fish
 - Ouboter et al. 2012, Mercury Levels in Pristine and Gold mining impacted aquatic ecosystems of Suriname, South America
 - Pease et al. 2016, Single camera trap survey designs miss detections : impacts on estimates of occupancy and community metrics
 - Pelaez et al. 2019, Environmental heterogeneity and dispersal limitation explain different aspects of β -diversity in Neotropical fish assemblages
 - Portillo et al. 2023, Mercury bioaccumulation in bats in Madre de Dios, Peru : implications for Hg bioindicators for tropical ecosystems impacted by artisanal and small-scale gold mining
 - Pottier et al. 2020, Electrofishing in streams of low water conductivity but high biodiversity value : Challenges, limits and perspectives
 - Pottier et al. 2022, Optimising electrofishing settings for shrimp and fish in shallow tropical streams
 - R.Gerson et al. 2022, Amazon forests capture high levels of atmospheric mercury pollution from artisanal gold mining
 - Rahm et al. 2017, Monitoring the impact of gold mining on the forest cover and freshwater in the Guiana Shield
-

- Roa-Fuentes et al. 2019, Taxonomic, functional, and phylogenetic β -diversity patterns of stream fish assemblages in tropical agro-ecosystems
- Régine et al. 2006, Mercury distribution in fish organs and food régimes : Significant relationships from twelve species collected in French Guiana (Amazonian basin)
- Sales et al. 2020, Space-time dynamics in monitoring neotropical fish communities using eDNA metabarcoding
- Scheingross et al. 2014, Experimental evidence for fluvial bedrock incision by suspended and bedload sediment
- Stokeld et al. 2016, Multiple cameras required to reliably detect feral cats in northern Australian tropical savanna : an evaluation of sampling design when using camera traps.
- Taberlet et al. 2012, Towards next-generation biodiversity assesment using DNA metabarcoding
- Van de Meutter et al. 2005, Water turbidity affects predator-prey interactions in a fish-damselfly system
- Vincent et al. 2023, Multi-sensor airborne lidar requires intercalibration for consistent estimation of light attenuation and plant area density
- Villéger et al. 2017, Functional ecology of fish : Current approaches and future challenges
- Wrong et al. 2019, Influence of body mass, sociality, and movement behaviour on improved detection probabilities when using a second camera trap.
- Zeni et al. 2019, How deforestation drives stream habitat changes and the functional structure of fish assemblages in different tropical regions
- Zinger et al. 2020, Advances and prospects of environmental DNA in neotropical rainforests

IX. Annexes

Planche photographique des missions ADNe novembre-décembre 2022





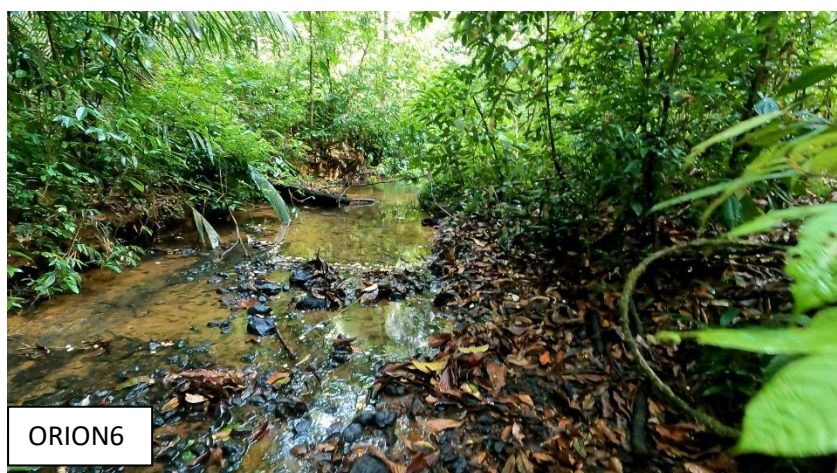
ORION4 amont



ORION5



ORION5 amont



ORION6



Aval direct du site ORION6, 1 an avant la campagne ADNe



ORION7 amont



ORION8



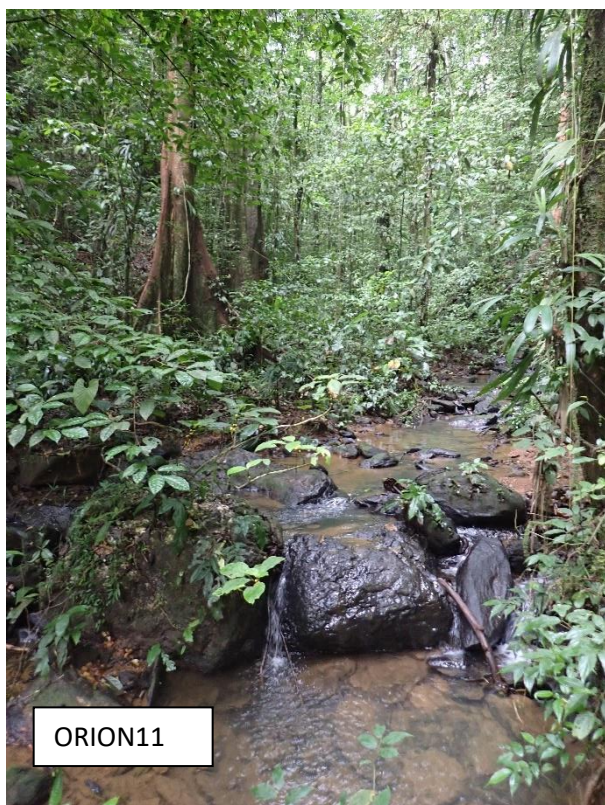
ORION8 amont



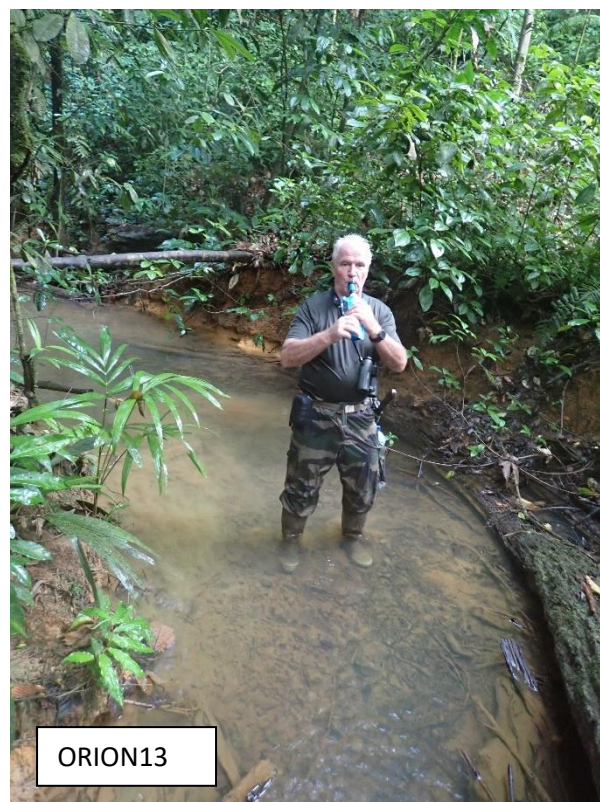
ORION9



ORION10 amont



ORION11



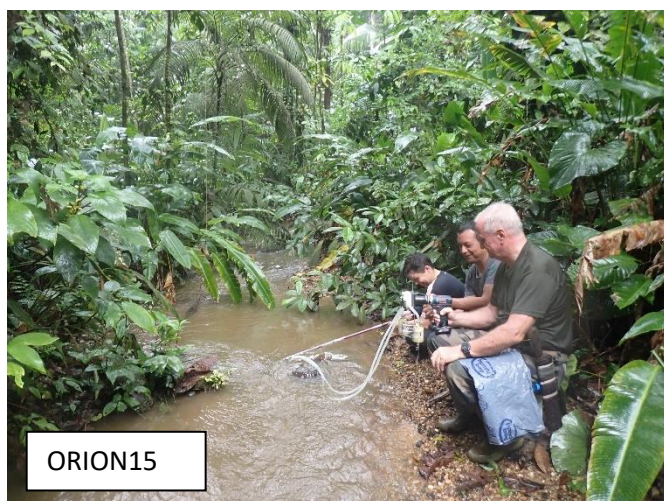
ORION13



ORION12



ORION14



ORION15



ORION16



ORION17



ORION18



ORION19



ORION20

Planche photographique des zones prospectées par ADNe couplées à l'inventaire des invertébrés aquatiques, des poissons par pêche à l'électricité et à des mesures physicochimiques :





Site 3

© Hadrien Lalagüe



Site 4

© Hadrien Lalagüe

Stratégie de Lutte contre l'Orpaillage Illégal de la Réserve des Nouragues :

| Phasage de la stratégie LCOI-Nouragues |
|---|
| <p>Phase I : amélioration des connaissances du terrain : reconnaissance terrestre pour adaptation de la LCOI (connaissance topographique et hydrographique, repérage aérien ou terrestre des pistes, zones de prospections primaires, campements sous couvert forestier, points de dépôt, caches, couverture LIDAR...)</p> |
| <p>Phase II : harcèlement d'interventions LCOI dans la RNN avec destruction des campements et des chantiers tous les 15 jours ou 3 semaines</p> <p>importance de l'approche fine et discrète avec analyse tactique topographique au préalable</p> <p>importance du déploiement d'un réseau de DZ (zone de poser hélicoptère) pour intervention régulière et adaptable face à la réactivité des orpailleurs clandestins</p> |
| <p>Phase III : routine d'intervention LCOI, 1 fois par mois (vol de renseignement/dissuasion et/ou intervention LCOI directe si besoin)</p> <p>importance d'un suivi post destruction pour suivi de la réactivité de l'activité illégale (lien phase I pour le renseignement)</p> |
| <p>Phase IV : mission LCOI en pourtour des Nouragues pour traiter les secteurs proches (Benoit, Ekin, Armontabo...) pour faire reculer l'orpaillage illégal + travail sur périmètre de protection sans orpaillage en pourtour de la Réserve (renfort contrôle légal)</p> <p>importance de la jugulation des flux (barrages fluvial de l'Approuague et routier de Bélizon et poursuites judiciaires en cas de flagrant délit)</p> |
| <p>Phase V : occupation du terrain sur les chantiers désactivés pour déployer de nouvelles activités et décourager la réinstallation clandestine. Les projets type ORION permettent d'occuper le terrain par la science en développant la stratégie scientifique de la RNN tout en servant la LCOI par la présence <i>in situ</i>.</p> |

Remerciements :

Nous tenons à remercier tout particulièrement la DGTM pour nous avoir soutenus en finançant ce projet.

Merci à l'ensemble des partenaires LCOI, EMOPI, 3ème REI, gendarmerie et l'Unité Spéciale Nature de l'ONF qui grâce à une stratégie conjointe a permis l'éradication de l'orpaillage illégal dans la Réserve. Merci à la DGTM de nous avoir soutenu dans l'obtention des financements pour la LCOI.

Merci à l'ensemble des participants des différentes missions :

Nils Servientis, Alexandre David, Jérémy Lemaire, Rosanna Mangionne, Marine Trillat, Pauline Lepage, Régis Vigouroux, Jean-Michel Guiraud, Grégory Quartarollo, Gaëtan Pottier, Hadrien Lalagüe, Hélène Richard, Antoine Loby, Emmanuelle Huet et Philippe Gaucher.

Merci à Jacklyn Durrenberger et Hadrien Lalagüe pour les magnifiques photos de mission.

Merci à l'ensemble des membres de notre conseil scientifique : Nicolas Bargier, Simon Clavier, Marjorie Gallay, Rosanna Mangionne, Jérémy Lemaire, Alizée Ricardou, Kévin Pineau, Marine Trillat, Hélène Delvaux, Emmanuelle Huet, Jérôme Muriennne, Sébastien Brosse, qui nous ont aidé à calibrer les protocoles et orienter nos questions scientifiques en lien avec nos questionnements de gestionnaires.

Merci à Pierre-Yves Le Bail pour son aide sur le tri et la correction des espèces de poissons présentes sur le bassin versant de la Haute Comté.

Merci à Jérôme Muriennne, Régis Vigouroux, Alexandre David, Caroline Bedeau, Kévin Pineau, Clémentine Couteaux, Marjorie Gallay, Mathieu Rhoné, Hélène Richard, Jérémy Lemaire et Simon Clavier pour la relecture du rapport.

RAPPORT SCIENTIFIQUE

Rapport final du projet d'Observatoire Résilience des Impacts Orpaillage Nouragues (ORION)

CONTACTS / AUTEURS

Guillaume DELAITRE

Chargé de projets scientifiques de la RNN
Nouragues

guillaume.delaitre@gepog.org

05 94 29 46 96

Jennifer DEVILLECHABROLLE

Conservatrice de la RNN Nouragues

jennifer.devillechabrolle@onf.fr

06 94 20 62 72

Crédits photos : © Alexandre DAVID