

PROJET DISTEP

Démonstration d'un outil_logiciel de Diagnostic en ligne pour des
STations d'EPurations d'eaux usées intelligentes

N° 110 31 7138

RAPPORT FINAL

Date 23/11/23

N° 110 31 7138

Auteurs :

Xavier Lefebvre, CRITT GPTE, INSA Toulouse

Michel Mauret, CRITT GPTE, INSA Toulouse

Jérôme Fehrenbach, IMT, Université Paul Sabatier, Toulouse

Brice Arnault, IUT Génie Informatique, Université Paul Sabatier, Toulouse

Antoine Pelux (OIEau)

Correspondant : xavier.lefebvre@insa-toulouse.fr

Liste de diffusion

ariette.sourzac@eau-adour-garonne.fr

jean-pierre.serrano@eau-adour-garonne.fr

jocelyne.di-mare@eau-adour-garonne.fr

SOMMAIRE

Positionnement du projet

Vers une efficience épuratoire et énergétique des stations biologiques de traitement des eaux usées urbaines

Contexte et Objectifs Généraux.....	4
Principe de l'outil <i>efstep</i>	5
Intervenants.....	7
Démarche adoptée.....	8

Démonstration

L'industrialisation d'un outil de diagnostic et évaluation en conditions réelles d'opération

Lot 1. Génération et Collecte des données	10
Lot 2. Code de calcul DISTEP.....	13
Lot 3. Application Web DISTEP	19
Lot 4. Pertinence et robustesse du diagnostic	21
Lot 5. Retours des exploitants des stations équipées.....	39

Conclusions et suites

Résultats marquants.....	40
Domaine d'application	41
Livrables et indicateurs de réussite.....	41
Diffusion, communication et formation	42
Transfert et commercialisation	42
Perspectives	43

Annexes

Positionnement du projet

Vers une efficacité épuratoire des stations biologiques de traitement des eaux usées urbaines

Contexte et Objectifs Généraux

Dans le domaine du traitement des eaux usées, le gestionnaire d'une station d'épuration est soumis à deux contraintes majeures. D'une part, le durcissement de la loi sur l'eau en matière de rejets l'oblige à toujours améliorer et surtout à fiabiliser ces rejets, d'autre part, une nécessité économique de plus en plus forte l'incite à optimiser les coûts d'exploitation. On peut citer par exemple le poste le plus énergivore : l'aération.

D'une manière générale, le parc de stations est composé de stations de petites tailles (cas du bassin Adour Garonne : 57% des stations inférieures à 2000 EH ; 88% des stations inférieures à 10 000 EH et quelques « grandes » stations sur le bassin). Dans ces dispositifs, le processus d'épuration est principalement assuré par des réactions biologiques soumises à des perturbations permanentes (charge, température, environnement successivement aérobie, anoxie et anaérobie...). Le maintien de niveaux de traitement élevés (DCO, azote, phosphore) à moindre coût nécessite la mise en place de méthodes de suivi et de diagnostic de plus en plus précises et efficaces. Estimer en ligne l'état biologique du système d'épuration est donc un enjeu majeur pour élaborer des stratégies optimales de contrôle de ce même système. Introduire des outils « intelligents » pour une station autonome est une contribution pour atteindre de manière durable l'objectif du bon état écologique des masses d'eau auxquelles sont connectées ces mêmes unités d'épuration.

Pour ce faire, les applications développées utilisent des capteurs plus ou moins rustiques : oxygène, redox ou onéreux : ammonium ou nitrate. L'INSA de TOULOUSE a développé un automate dénommé INFLEX reposant sur l'analyse en temps réel des dynamiques des signaux redox et oxygène. Cette analyse permet de détecter les fins de réactions biologiques de nitrification et dénitrification qui varient en fonction de la charge entrante et donc de piloter les aérateurs. De ce fait, l'automate INFLEX exploite au maximum les capacités de traitement de la station tout en minimisant l'énergie nécessaire. Ce dispositif a été transféré, via Toulouse Tech Transfert, à la société BIOTRADE (31) qui propose désormais cette offre technologique pour piloter les dispositifs d'aération des stations d'épuration biologique. A ce jour, une cinquantaine d'INFLEX sont en fonctionnement, dont la moitié auprès de régies et syndicats exploitant des stations d'épuration sur le bassin ADOUR GARONNE. Les retours d'expérience sont excellents en termes de respect des seuils de rejet et de fiabilisation de traitement avec parfois des résultats d'économie d'énergie spectaculaires : 100 000 Kwh/an sur la station de PAMBIERS (09) et 40 % d'économie sur la station de BAUDREIX (65).

Néanmoins, au-delà de l'optimisation du pilotage de l'aération, une station d'épuration reste un système complexe dans son exploitation et affectée par de multiples facteurs subis (ex : la température, pic de charge associée aux périodes touristiques) ou provoqués (ex : gestion de la purge de boue). Cette complexité difficilement appréhendée par le personnel d'exploitation conduit parfois à mettre en défaut l'efficacité des dispositifs de pilotage (paramétrage ponctuellement inadapté). Le personnel d'exploitation est un personnel itinérant en charge de plusieurs stations. Les missions se concentrent sur des interventions sur les ouvrages de prétraitement et de déshydratation des boues. Ils disposent de peu de temps et de compétences pour diagnostiquer le fonctionnement du bassin biologique, si ce n'est à travers les mesures ponctuelles sur les rejets.

Il apparaît donc indispensable de fournir aux exploitants des outils « intelligents » pour les assister dans la gestion de son unité de traitement et contribuer ainsi à l'objectif de qualité des

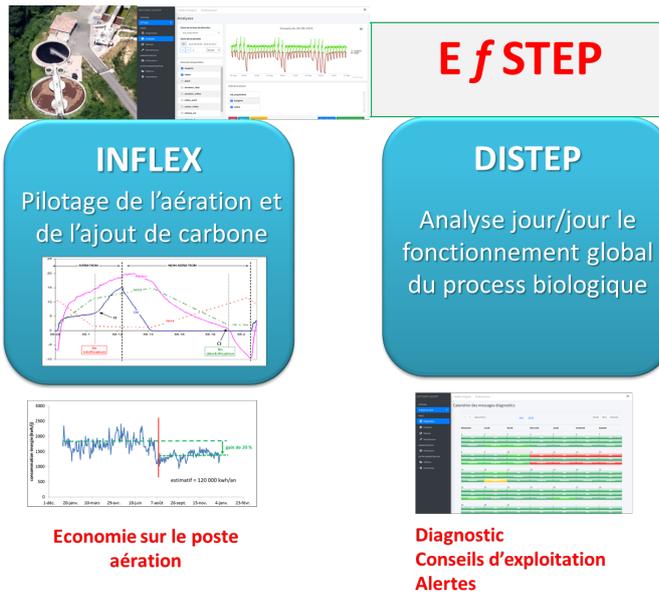
masses d'eau du bassin Adour Garonne. Ces outils sont aussi une porte ouverte vers la mise en place d'une traçabilité de qualité des eaux traitées.

L'INSA et l'IMT ont développé DISTEP, un code de calcul pour diagnostiquer le fonctionnement et les performances épuratoires d'une station d'épuration municipale. L'approche repose l'analyse des mesures l'oxygène et potentiel redox acquises via l'automate INFLEX. Ce prototype (TRL3) a été conçu à partir de données disponibles hors ligne. L'objectif principal du projet est de démontrer l'opérationnalité d'un tel code de calcul en l'intégrant sous la forme d'une application logicielle connectée à la station d'épuration, de l'éprouver en conditions réelles et de porter cette innovation à un TRL 8-9. Le diagnostic de la qualité de traitement sera généré journalièrement et de manière automatique. Le second objectif est d'évaluer si la fiabilité du diagnostic est suffisante pour établir une traçabilité de la qualité des rejets. INFLEX et DISTEP constitue une solution globale de gestion de la fonction biologique d'une station d'épuration. Cette solution a été dénommée *efstep*

Principe d'*efstep*

La solution *efstep* est un outil intégré de gestion du bassin biologique de la station d'épuration composé (figure 1) :

- D'une composante matérielle, l'automate INFLEX : celui-ci adapte en temps réel la durée des phases d'aération en fonction de la pollution à traiter et de la capacité épuratoire de la station : épuration optimale à moindre coût. Il est implanté sur la station. Les données oxygène dissous et potentiel redox, utilisées pour piloter le système d'aération, sont envoyées sur un serveur WEB.
- D'une composante logicielle, DISTEP qui repose sur une méthode dite d'intelligence artificielle de type machine learning. Ce code de calcul se trouve sur un serveur WEB. Au travers du traitement des signaux oxygène dissous et potentiel redox, le fonctionnement biologique de la station est analysé en ligne. Un bilan quotidien est produit incluant qualité du traitement de l'azote, l'efficacité énergétique et des recommandations aux exploitants. Toutes ces données sont stockées et cet archivage assure ainsi une traçabilité du procédé.



1

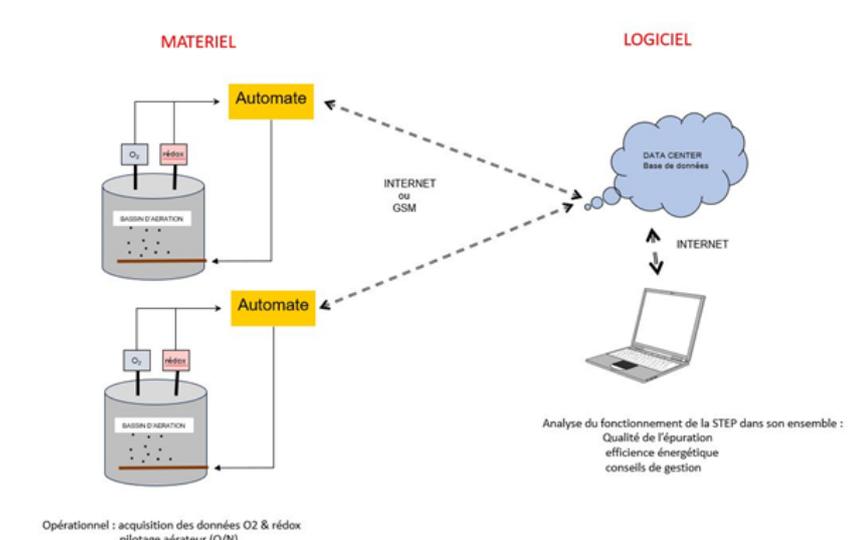


Figure 1 - Principe de fonctionnement de efstep

La solution efstep a été conçue pour placer et maintenir la station dans une position d'efficacité épuratoire et. Cet état est illustré par la figure 2. La sphère représente un espace tridimensionnel réduit (puissance d'aération, durée d'aération et taux de boue) dans lequel l'objectif de traitement à moindre coût énergétique est atteint.

Pour une station donnée et une pollution à traiter, il existe effectivement un point de fonctionnement optimal. A ce point, l'exploitant a parfaitement bien réglé la puissance d'aération le taux de boue et l'automate INFLEX qui gère au mieux le séquençage de l'aération (durée d'aération). Au-delà de l'optimisation du pilotage de l'aération, une station d'épuration reste un système complexe, en perpétuelle évolution et soumis à de multiples facteurs. Cette complexité et cette instabilité sont parfois difficiles à appréhender et exige de l'exploitant compétences, expériences et réactivité. C'est là qu'intervient la fonction DISTEP qui analyse en temps réel le fonctionnement du process pour vérifier s'il est toujours dans sa zone d'efficacité

maximale. Il prévient alors l'exploitant d'éventuelles dérives, en explique les causes et donnent des pistes pour y remédier (paramétrage de l'algorithme INFLEX, ajustement de la concentration en boue, ajustement de la puissance d'aération). L'exploitant est alors en mesure de replacer, si besoin, le fonctionnement du bassin biologique dans sa zone d'efficacité.

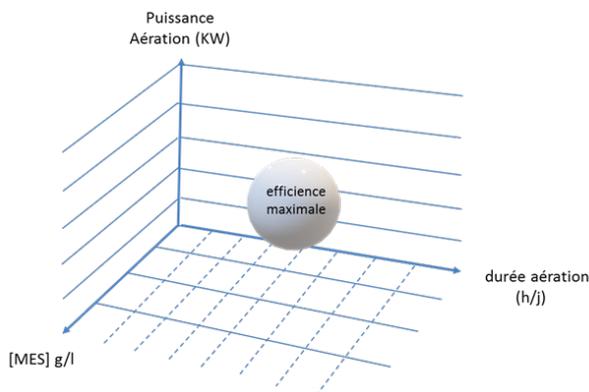


Figure 2 – réglage du bassin biologique pour une efficacité maximale

Intervenants

Ce projet a fédéré :

1. Le CRITT GPTE dispose de compétences en termes de conduite et d'évaluation de procédés à l'échelle industrielle. Il est à l'origine du transfert technologique de l'automate INFLEX pour le pilotage et l'optimisation des performances épuratoires des stations d'épuration.
2. L'Institut de Mathématiques de Toulouse développe des activités dans tout le spectre des mathématiques, y compris dans les applications. C'est l'équipe SO (Statistique et Optimisation) qui est ici impliqué dans le développement du code de calcul
3. L'office International de l'eau, organisme expert dans le secteur de l'assainissement.

Organismes	Adresse	Personne contact
INSA Toulouse	135 avenue de rangueil 31077 Toulouse cedex 4	lefebvre@insa-toulouse.fr
IMT	Université Paul Sabatier 118, route de Narbonne F-31062 Toulouse Cedex 9	jerome.fehrenbach@math.univ-toulouse.fr
Office International de l'eau	22 Rue E.Chamberland 87100 Limoges	j.louchard@oieau.fr

Démarche

Ce projet s'est déroulé sur une durée de 18 mois, et les tâches ont été rassemblées en 6 lots de travail (figure 3) :

- Lot 1 : génération et collecte de données en ligne sur des stations d'épurations
- Lot 2 : code de calcul DISTEP
- Lot 3 : application WEB DISTEP
- Lot 4 : analyse de la pertinence et robustesse du diagnostic
- Lot 5 : retours des exploitants des stations équipées
- Lot 5 : diffusion, sensibilisation et formation
- Lot 6 : valorisation et commercialisation

Démarche

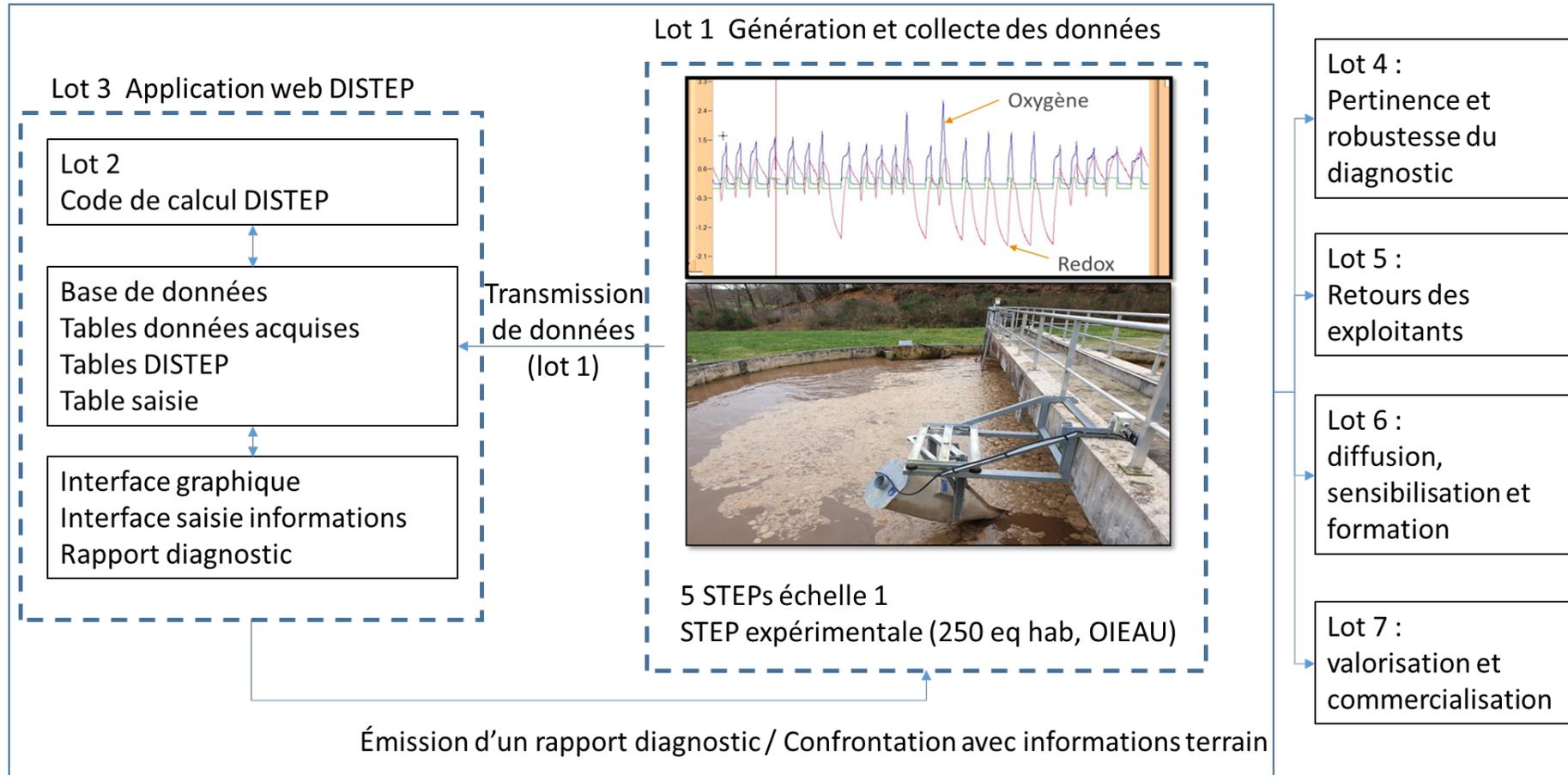


Figure 3 – Organisation des lots de travaux du projet DISTEP

Démonstration

L'industrialisation d'un outil de diagnostic et évaluation en conditions réelles d'opération

Lot 1. Génération et Collecte des données – Automate INFLEX

Objectif :

L'automate INFLEX de la solution e/step a deux fonctions : d'une part piloter le système d'aération de la station en temps réel et de manière autonome d'autre part, transférer les données ainsi générées à une base de données implantée sur un serveur WEB.

Démarche :

Recherche d'un matériel adapté et développement des algorithmes et procédures nécessaires pour établir la circulation des données entre l'automate et le serveur.

Validation du matériel sur la station pilote de l'OIEAU

Résultat :

Pour rappel, le principe de fonctionnement de l'algorithme INFLEX est décrit en annexe 1.

L'algorithme INFLEX a été codé dans un automate. Cet automate est un élément clé du dispositif e/step. Il a trois fonctionnalités : acquérir les signaux O₂ et rédox, utiliser ces signaux dans l'algorithme INFLEX pour piloter le système d'aération, envoyer ces signaux à la base de données DISTEP. La fonction connectée de l'automate nous a obligé à migrer l'application INFLEX vers un matériel de dernière génération. A cela s'est ajouté la nécessité de faciliter les modifications ou améliorations du code.

1. Sélection du matériel

Le choix de l'automate a donc fait l'objet d'une réflexion approfondie.

Après une analyse méthodique du marché, nous avons choisi un automate de marque UNITRONICS. Cet automate de dernière génération est particulièrement bien adapté à notre application :

- Le nombre d'entrées/sorties est modulable.
- Une configuration de base suffit pour notre application.
- L'écran est optionnel.
- Le logiciel de développement utilise des langages standardisés (LADDER, C), avec des fonctionnalités mathématiques qui facilitent grandement la programmation.
- Cet automate contient un client SQL qui permet une communication directe avec un serveur de base de données pour le stockage à distance des relevés.
- Un système de communication à distance performant à un très bon rapport qualité/prix.

Grâce à l'ajout d'un routeur GSM, le mode de communication via une carte GSM multi opérateurs, assure à la fois une grande portabilité du système et une indépendance par rapport au système et réseau informatique présent (ou pas) sur le site.

Les données sont acquises par l'automate avec une fréquence de 30 secondes et stockées temporairement dans l'automate. Toutes les 15min, l'automate transfère les données dans une base de données distantes. Au final, dans sa version portable, l'automate a été implanté dans une petite armoire électrique (figure 4)

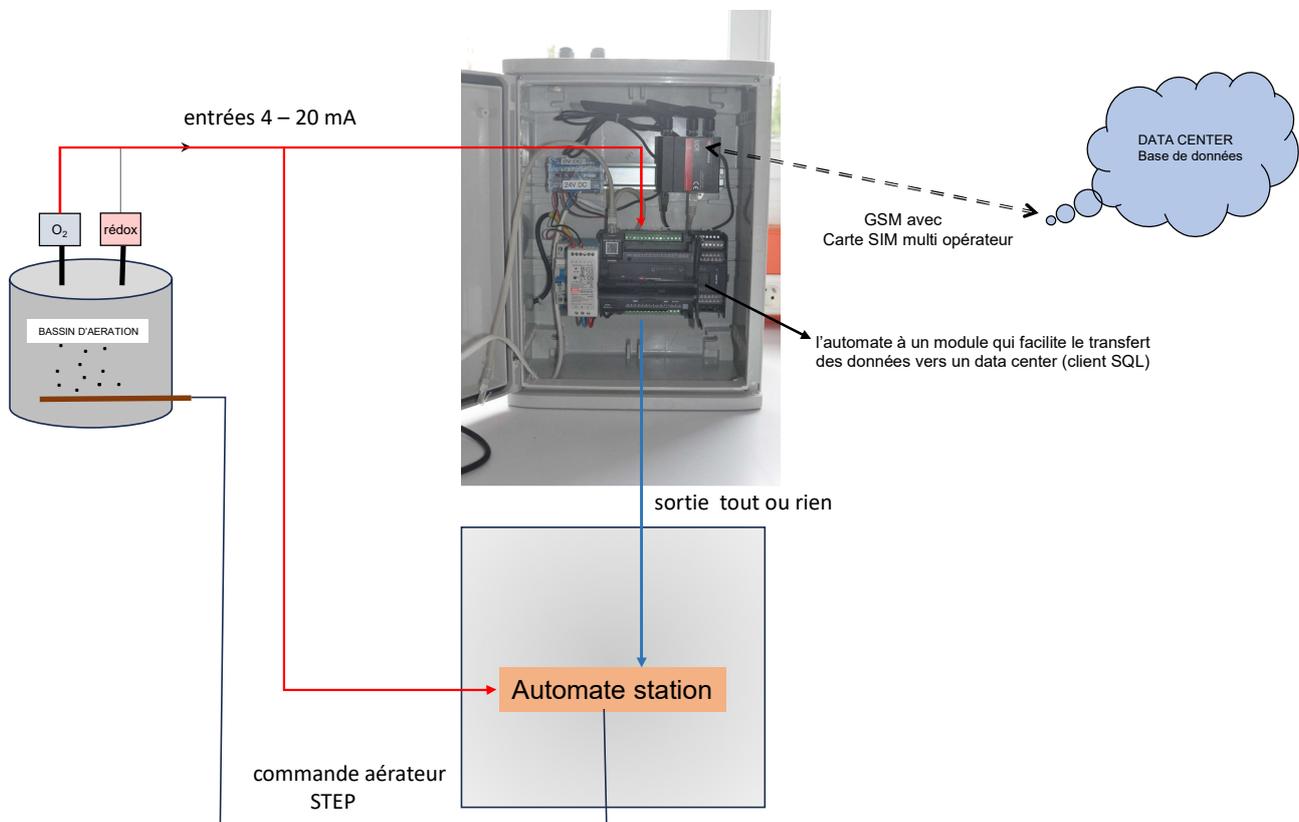


Figure 4 : principe d’implantation du module INFLEX communiquant

2. Validation du développement

Le développement de l’outil a été validé sur la station de l’OIEAU (figure 5). Il a été implanté pendant 6 mois et soumis à différentes situations. Cette implantation a permis de valider l’ensemble du dispositif et en particulier la transmission des données par l’automate vers le serveur pour alimenter les tables de données de l’application WEB.

Les essais sur la station ont permis de soumettre le dispositif à des situations extrêmes du type : sur aération, sous aération, cycles d’aération, taux de boues, variations de débits. L’instrumentation de cette station a permis de corréler les diagnostics et les teneurs en ammonium et nitrate dans le bassin (figure 6). Deux exemples de diagnostic complets sont disponibles en annexe 2.



Figure 5 – station OIEAU (250 eq hab) et le nouveau dispositif INFLEX communiquant

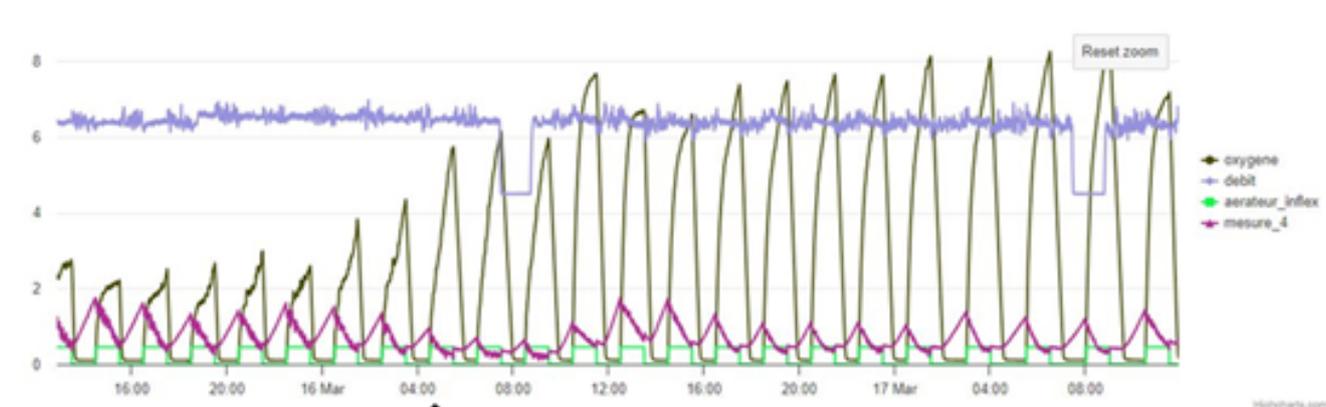


Figure 6 – enregistrement des profils de concentration d’ammonium (violet), d’oxygène dissous et de débit (station expérimentale OIEau 250 eq hab)

Lot 2. Code de calcul DISTEP

Objectif :

Le code de calcul DISTEP est associé à l'algorithme INFLEX qui gère le séquençage de l'aération. Il traite en ligne mais différemment le même jeu de données (oxygène et redox). Il en déduit l'état de fonctionnement du bassin biologique et sa position vis-à-vis d'un point de fonctionnement optimal (traitement de l'azote et consommation énergétique). Ce diagnostic permet à l'exploitant de maintenir son système dans la zone optimale de fonctionnement en agissant sur les leviers à sa disposition à savoir : paramétrage de l'automate (algorithme INFLEX), ajustement du taux de boue dans le bassin et réglage de la puissance d'aération. Cette partie décrit le principe de fonctionnement de DISTEP.

Démarche et principe :

Dans un bassin biologique aéré en continu, l'analyse dynamique des variations de la concentration en oxygène dissous renseigne directement sur l'état d'avancement de la nitrification. Ainsi, l'apparition d'un point d'inflexion (α) est synonyme de l'oxydation complète de l'ammonium. Il en va de même pour la phase non aérée. L'analyse dynamique des variations du potentiel rédox informe directement sur l'évolution de la dénitrification.

Le concept DISTEP consiste à établir un diagnostic global du traitement de l'azote sur une période de 24h à partir de l'analyse simultanée de tous les profils O_2 et REDOX observés sur cette période. Autrement dit, INFLEX génère des données O_2 et REDOX en temps réel par le biais du séquençage de l'aération, DISTEP interprète ces données pour évaluer le fonctionnement global du process.

Il est important de rappeler ici que seules les données issues d'une station pilotée par INFLEX sont utilisables. En effet, grâce aux temporisations minimales et maximales d'aération et non aération, INFLEX garantit toujours un cadre (ou domaine) maîtrisé de fonctionnement du bassin biologique.

Le principe de base repose sur une identification d'un nombre défini de motifs oxygène et redox dont l'enchaînement représente les profils mesurés en continu. Ces motifs se succèdent dans un ordre et une fréquence variable. C'est une image de l'état de fonctionnement du système biologique. Ces motifs sont renseignés dans une bibliothèque de forme qui est appelée par l'algorithme de diagnostic

Résultats : Traitement et organisation des données

1. Définition des motifs de la bibliothèque

- Les motifs liés au profil oxygène

Bien que les motifs O_2 soient variables, ils sont toujours classables en un nombre fini de typologies et variantes. La figure 7 illustre ces typologies et variantes.

Leurs apparitions sont liées à deux rapports :

- Capacité biologique de nitrification et la charge à traiter.
 - Demande biologique globale en oxygène et la capacité d'oxygénation appliquée.
- Les motifs liés au profil du potentiel redox

Au cours de la dénitrification, différents types de motifs sont observés en fonction du rapport entre la capacité de dénitrification et la charge en nitrate à réduire. Ces 3 cas sont illustrés sur la figure 8.

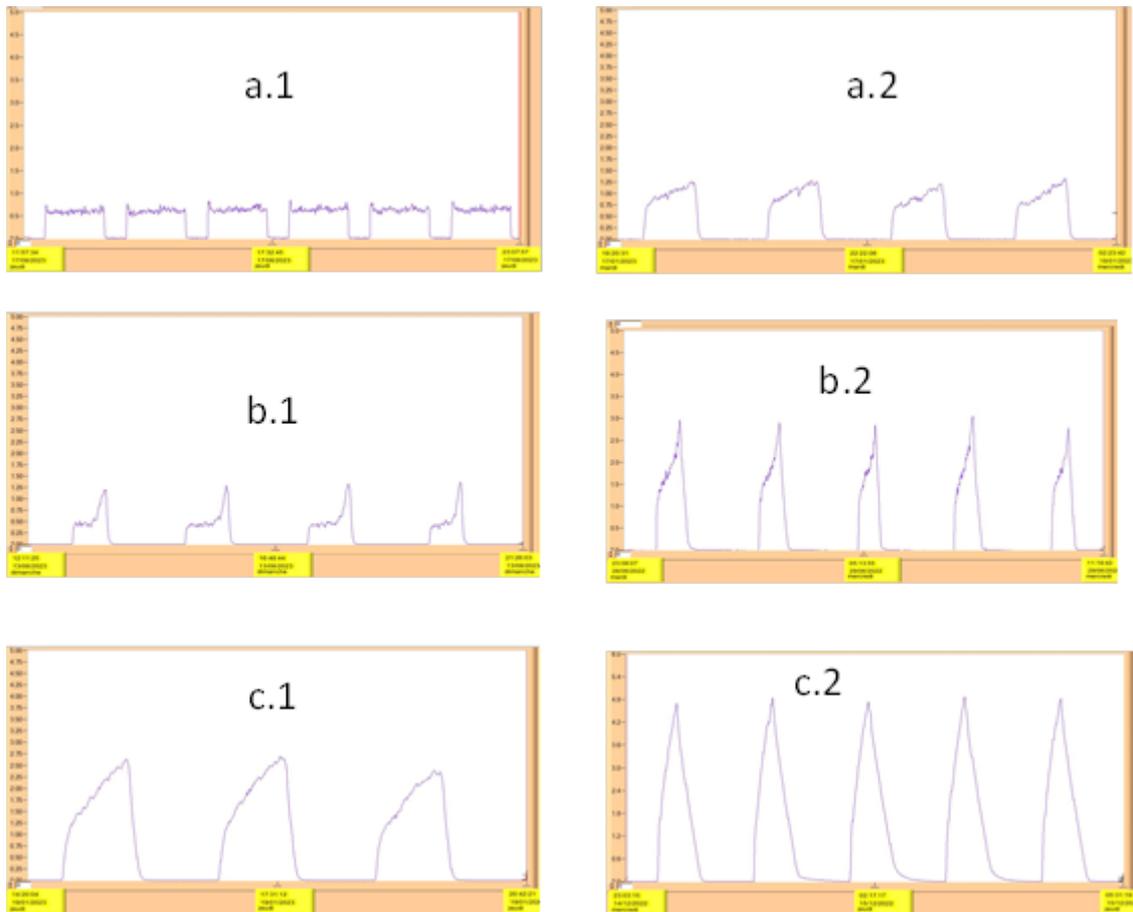


Figure 7 - principales typologies de variations de l'O₂

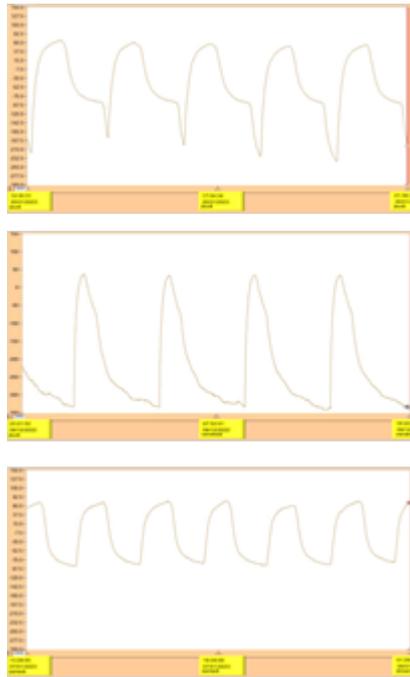


Figure 8 - principales typologies de variations du rédox

2. Architecture de DISTEP : base de données & procédures

La base de données DISTEP est constituée de tables de données de deux codes de calcul et d'un script de gestion de l'interface du site WEB :

- Une table "**acquisition**" contient toutes les données brutes issues de chaque site (O₂, rédox, inflex actif ...). Ce sont des tables très volumineuses. Une table pour chaque site n.
- Une table "**station**" contient d'une part les données générales caractéristiques de chaque station (volume du bassin biologique, débit d'entrée, nom de l'exploitant ...) et d'autre part des données qui vont permettre si besoin d'adapter (de calibrer) le diagnostic aux spécificités de chaque station. Ces données sont utilisées par le code qui fait le traitement mathématique de chaque cycle et bien évidemment par la procédure de diagnostic.
- Une table "**analyse**" contient tous les paramètres provenant de la procédure d'analyse mathématique qui, pour **chaque** station, analyse indépendamment **tous** les cycles aération/non-aération.
- Une table "**agrégation**" est constituée de données agrégées qui sont introduites dans une procédure de diagnostic aboutissant à un cas de fonctionnement de la STEP et un ensemble de messages qui lui sont associés.

Au final, au niveau du site WEB, un programme utilise ces tables pour renseigner l'interface proposée aux utilisateurs.

3. Traitement mathématique des motifs : étape 1 de la procédure de diagnostic

L'analyse mathématique des données brutes est faite cycle par cycle. Un cycle est composé d'une phase aérée suivie d'une phase non-aérée. Dans un premier temps, l'algorithme vérifie la présence, la cohérence des données et le fait qu'INFLEX soit actif. Si un de ces critères n'est pas vérifié, le cycle n'est pas traité et un message spécifique est renvoyé.

Si les données sont exploitables, le cycle "aération puis non-aération" est traité. Dans chacune des parties aérée/non aérée, le signal est approché par un motif simple défini dans la bibliothèque. La procédure mathématique consiste à repérer la forme du motif, approximer les données brutes par des données modélisées et extraire de celles-ci les paramètres clé.

Parfois, l'identification d'un motif peut être ambigu. Pour répondre à tous ces cas, l'approche mathématique est structurée de telle manière qu'un seul paramètre oriente la réponse d'un côté ou de l'autre. Ce paramètre peut être ajusté pour chaque station et a été fixé à priori par l'expert selon ses connaissances, son recul, et des analyses terrain.

4. Agrégation des données : étape 2 de la procédure de diagnostic

A partir des données extraites de chaque cycle, une procédure informatique agrège les données sur un intervalle de temps. Cette opération consiste à calculer sur cette période le pourcentage des différentes typologies de variations de l'O₂ et du rédox. D'autres grandeurs caractéristiques de ces profils estimées.

5. Apprentissage machine : étape 3 de la procédure de diagnostic

C'est l'étape clé du dispositif, elle suppose que l'expert a rencontré et identifié tous les états de fonctionnement possibles d'une station. D'autre part, à partir des paramètres à sa disposition, il sait comment discriminer ces différents états avec une fiabilité acceptable. Autrement dit, l'objectif est que le découpage en différents états soit suffisamment judicieux pour arriver à un diagnostic le plus précis et explicite possible.

L'apprentissage machine s'effectue sur 3 niveaux :

Niveau 1 : la construction d'un arbre de décision qui discrimine plusieurs états de fonctionnement de la station.

Niveau 2 : l'association des messages de diagnostic au différents indicateurs représentatifs de chaque état.

Niveau 3 : le critère de récursivité

Niveau 1 :

DISTEP définit chaque état de fonctionnement de la STEP par **des indicateurs macroscopiques** relatifs aux résultats épuratoires, à la performance énergétique et au fonctionnement global du process. De plus, à chaque état, DISTEP associe si nécessaire des conseils d'exploitation.

Remarque fondamentale : il s'agit d'indicateurs qualitatifs et non quantitatifs. Par exemple, DISTEP détecte une fuite significative en ammonium et/ou en nitrate avec certitude mais ne peut pas quantifier cette fuite. DISTEP alerte l'exploitant et lui recommande de faire une analyse pour vérifier si son rejet est conforme.

Indicateurs de résultats épuratoires :

Traitement de l'ammonium et Traitement des nitrates

Remarque : l'expérience montre que sur des stations urbaines faibles charge si l'azote est correctement traité, le carbone l'est aussi. Si le traitement de l'azote peut s'avérer rapidement délicat, il est à noter qu'il faut une très mauvaise gestion du process pour aboutir à une dégradation du traitement du carbone. Le phosphate quant à lui est traité par voie biologique et/ou par voie physico-chimique

Indicateur de la performance énergétique de la STEP (état général de la step)

Basé sur l'analyse du profil d'oxygène

Le principal indicateur de performance énergétique est le profil de $[O_2]$. L'expérience montre qu'en deçà d'une certaine valeur seuil, la $[O_2]$ limite significativement la réaction de nitrification. Il en résulte une augmentation des durées d'aération et donc une dégradation de la performance énergétique de la STEP. Outre l'aspect énergétique, si cette diminution de la capacité biologique s'accompagne d'une augmentation de la pollution à traiter, la performance épuratoire du process peut être rapidement et fortement détériorée.

Indicateur de caractérisation du process :

Durée normale d'aération et Etat de charge/capacité biologique

Le paramètre "durée normale d'aération" est calculé en prenant en compte la charge à traiter et les conditions de fonctionnement de la station dictées par l'Homme de l'Art. Dans ces conditions, DISTEP estime une durée d'aération théorique dite "normale". Lorsque cet indicateur varie de plus de 20% par rapport à sa valeur "normale", DISTEP en informe l'utilisateur. Dans tous les cas, il s'agit d'une modification du rapport "charge à traiter / capacité biologique".

L'analyse simultanée de la "durée normale d'aération" et de la " $[O_2]_{moyenne}$ " permet par exemple de tracer des événements type dépotage ou arrivée d'une pollution non attendue et souvent non identifiée.

L'indicateur "état de charge/capacité biologique" est un indicateur qualitatif issu de l'analyse des profils $[O_2]$. Il qualifie à un instant t l'adéquation entre "charge à traiter et capacité biologique".

Réglages de l'automate et Conseils d'exploitation

De l'analyse croisée des différents indicateurs caractéristiques de l'état du système épuratoire, DISTEP émet des conseils ou recommandation d'exploitation :

- Ajustement du séquençage aération/non-aération par le biais des paramètres de l'automate INFLEX.
- Ajustement du niveau d'aération quand cela est possible
- Ajustement de la [MES] dans le bassin biologique.

Niveau 2 :

Pour chaque état, l'expert fixe un niveau pour chaque indicateur. A chaque niveau correspond un message de diagnostic.

Niveau 3 : le critère de récursivité

DISTEP associe à chaque état une série de messages. A cela, nous avons rajouté un critère de récursivité qui se traduit par le fait qu'un message peut varier en fonction de la répétition d'un même état. L'objectif est d'alerter uniquement si nécessaire. Par exemple, il est important de discriminer un événement ponctuel (par exemple un à coup de charge dû à un dépotage) d'un événement qui s'installe, arrivée d'un flux de population sur une zone touristique

Lot 3. Application Web DISTEP

Objectif :

Deux niveaux de lecture du diagnostic sont proposés à l'utilisateur :

- Une visualisation rapide des trois principaux indicateurs de fonctionnement du process : nitrification – dénitrification – état général du process.
- Une visualisation de l'ensemble du diagnostic (tous les indicateurs, remarques et conseils d'exploitation) à la demande de l'utilisateur.

Démarche :

Le concept est d'associer un code couleur en fonction du niveau de chaque indicateur :

- Vert : tout est normal
- Vert clair : le process n'est pas optimisé énergétiquement
- Orange : le niveau de l'indicateur n'est pas normal
- Rouge : le niveau de l'indicateur n'est pas normal de manière récurrente (alerte)
- Bleu : diagnostic non réalisé (INFLEX non actif, données incohérentes ...)

Le diagnostic journalier est organisé sous la forme d'un calendrier

Résultats :

L'application est actuellement sur un serveur (<https://www.distep.fr/>). La figure 10 illustre l'interface de l'application. La visualisation du diagnostic est rapide. Elle prend la forme d'un calendrier où chaque jour est découpé en 3 cases. Chaque case correspond à un indicateur clé du process : NH4 (nitrification) – NO3 (dénitrification) – état général. Le code couleur (vert-orange-rouge) renseigne sur le niveau de l'indicateur. Ainsi, "en un coup d'œil", l'utilisateur sait si tout va bien ou s'il y a un problème.

En cliquant sur un jour j, l'utilisateur accède à l'intégralité du diagnostic qui s'affiche plein écran sous la forme d'une liste de messages (et code couleur) relatifs aux différents indicateurs caractéristiques du process (figure 11). Si nécessaire, DISTEP affiche des remarques et conseils d'exploitation : message sur fond noir.



Figure 10 - page de visualisation rapide du diagnostic



Figure 11 - édition de l'ensemble du diagnostic

Lot 4. Evaluation de la pertinence et de la robustesse du diagnostic

Objectif :

- Evaluer DISTEP dans sa globalité : fiabilité et robustesse du diagnostic.
- Utilité du diagnostic.
- Compréhension des messages par l'exploitant.
- Pertinence des conseils de gestion.

Démarche :

Pour réaliser l'objectif nous avons sélectionné 5 stations susceptibles de confronter et valider (ou pas) DISTEP au plus grand nombre de situations possibles. Chaque station a été diagnostiquée sur une durée d'exploitation de 2 ans (2022 - 2023). Ces stations sont listées dans le tableau 1.

Comme le montre l'ensemble des bilans "officiels" réalisés sur ces 5 sites (voir annexes 2), si chaque station étudiée a bien évidemment ses propres problématiques il est important de préciser en préambule que toutes remplissent parfaitement bien leur fonction épuratoire !

Les événements observés sont rares mais toujours représentatifs de la "vie" d'une station. Certains sont classiques comme des variations de biomasse importante à la hausse ou à la baisse, des dépotages, des variations extrêmes de charge, un calibrage non adéquat de la puissance d'aération ou plus rares la panne du système d'aération.

Nous avons inséré cette validation dans le quotidien des exploitants, sans contrainte particulière. A noter que l'accès au diagnostic est bien évidemment sécurisé. L'exploitant se connecte à DISTEP par un identifiant et un mot de passe.

Après une formation de l'exploitant à l'interface DISTEP, nous avons demandé à l'exploitant de valider le diagnostic et plus particulièrement quand un événement particulier et significatif se produisait.

En parallèle, chaque événement particulier et significatif a été validé par un contact téléphonique direct ou à l'occasion d'une réunion avec l'exploitant.

Dans la partie résultats nous allons présenter les événements significatifs observés sur l'ensemble des stations et évaluer à chaque fois la réaction de DISTEP.

Les discussions régulières avec les exploitants montrent que tous les événements même les plus anecdotiques ou courants ont été repérés par DISTEP.

Tableau 1 – liste des stations équipées d'efstep

step	Taille Eq Ha	problématique	période d'analyse	
Villefranche de Lauragais (31)	9500	cas conventionnel	01/01/2022 au 01/10/2023	22 mois
saint lary (65)	21000 (2 F)	tourisme été - hiver	01/01/2022 au 01/10/2023	22 mois
Pamiers (09)	33000 (2F)	cas conventionnel	01/11/2022 au 01/10/2023	12 mois
st paul save (31)	2000	petite station	20/02/2022 au 01/10/2023	21 mois
langon (33)	30000	à coups de charge liés aux vendanges	22/07/2022 au 01/10/2023	15 mois
Oieau (19)	250	station expérimentale	01/03/2022 au 01/10/2023	19 mois

Résultats :

En préambule, il très important de préciser que toutes les stations étudiées remplissent parfaitement bien leur fonction épuratoire et sont très bien gérées. Les quelques événements observés sont rares et souvent dus à des pannes matérielles ou des contraintes particulières et souvent récurrentes, par exemple l'impossibilité d'extraire des boues. De plus, les problématiques sont connues de l'exploitant.

1. Traçabilité de la qualité du traitement

C'est le cas de toutes les stations que nous avons suivies au cours de cette étude. Nous parlons ici du volet épuratoire de la station. La figure 12 ci-dessous présente le diagnostic sur la station de Villefranche de Lauragais pour le mois de septembre 2023. Sur cette période, cette station a parfaitement bien fonctionné. Dans le calendrier, chaque jour est vert et, en cliquant sur un jour en particulier, toutes les cases d'informations sont vertes également. Les profils O_2 sont caractéristiques : nous observons sur 24h en fonction de la charge à traiter une grande majorité de plateaux-pics (>65%), quelques plateaux (1 ou 2), quelques remontées rapide (1 ou 2).

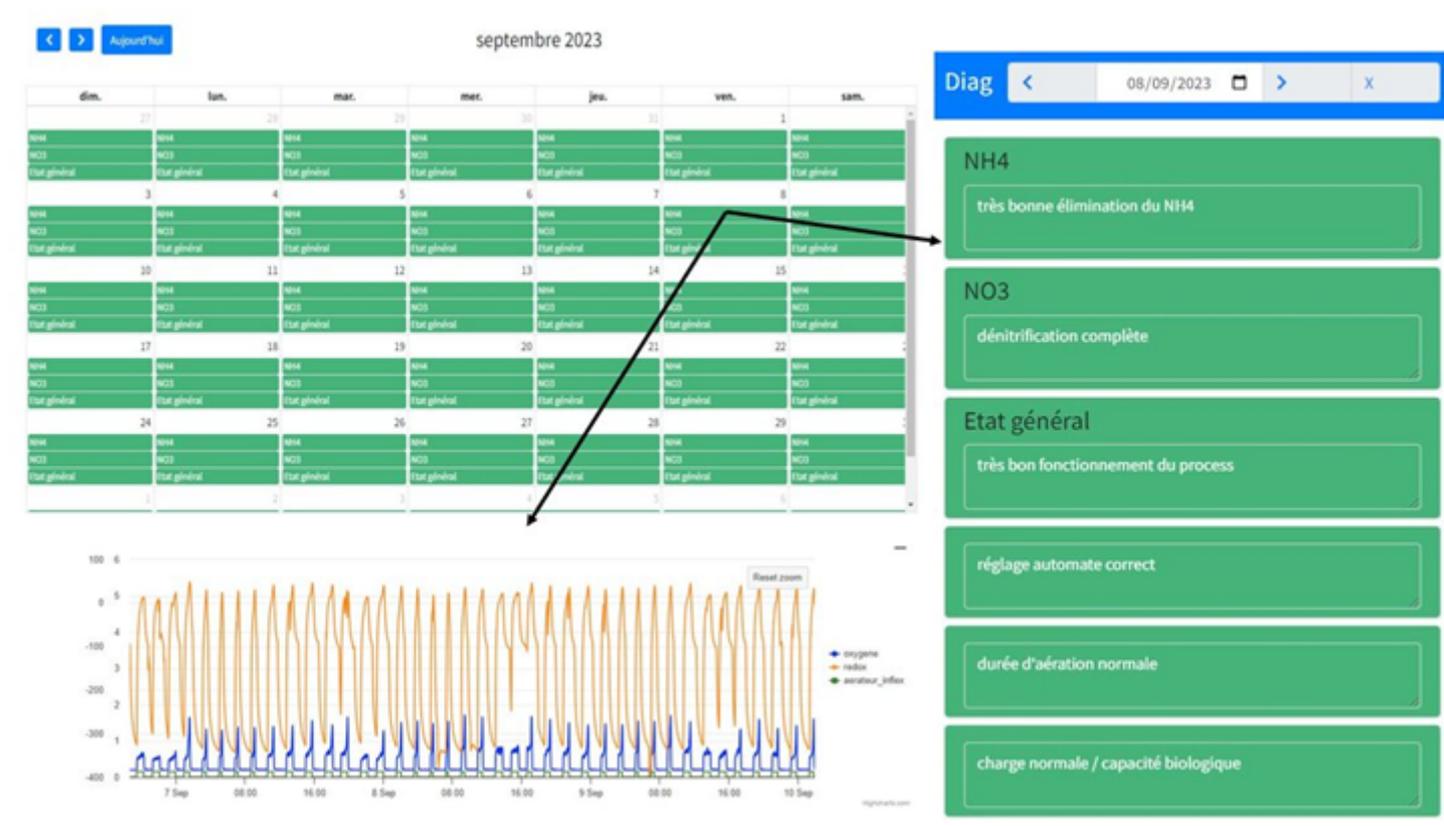


Figure 12 - cas d'une station qui fonctionne très bien.
Villefranche de LAURAGAIS septembre 2023.

2. Surveillance à distance d'une station de rase campagne

Nous avons choisi de montrer le cas de la station de Saint Paul sur Save qui est caractéristique d'une petite station (2000 Eq Ha) avec un exploitant qui passe régulièrement mais n'est pas sur place. D'autre part, cette station est aérée par trois turbines de surface qui fonctionnent de manière alternée. Comme le montre la figure 17 (courbe O₂ et rédox), ce système d'aération conduit d'une part à des variations d'oxygène différentes en fonction des turbines en fonctionnement et d'autre part à des signaux O₂ et rédox plus perturbés. La figure 13 ci-dessous présente le diagnostic pour le mois de juin 2023. Comme pour la station de Villefranche de Lauragais, tout est vert, il n'y a rien à signaler. Les profils O₂ sont caractéristiques : nous observons ici sur 24h 100% de plateaux-pics. Sur les 21 mois de suivi, **le fonctionnement d'efstep n'a jamais été mis en défaut. Ceci montre la robustesse de la solution même lorsque les signaux sont relativement bruités et son intérêt pour les petites stations dispersées sur le territoire, exigeant une surveillance à distance.**

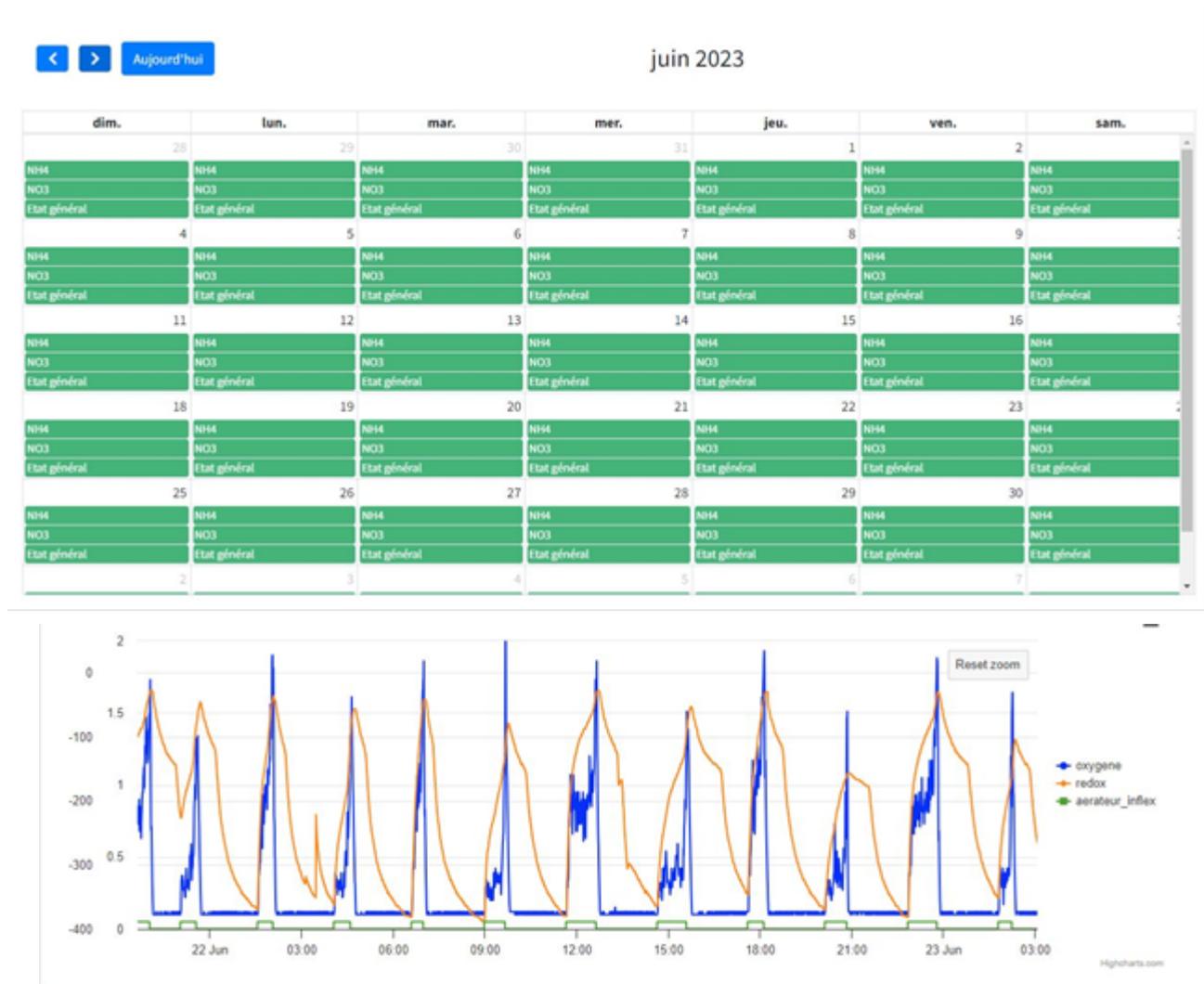


Figure 13 - cas d'une petite station qui fonctionne très bien. Saint Paul sur Save. A noter des signaux O₂ particulièrement perturbés et de niveaux différents en fonction des turbines en fonctionnement.

3. Détection et gestion d'un à-coup de charge

L'adaptation aux variations de charge est le lot quotidien d'une station d'épuration. Par la simple variation du débit à traiter et des concentrations dans l'eau usée, la charge de pollution à traiter n'est jamais la même.

Par à-coup de charge, nous entendons des événements particuliers et identifiés ou non. Ces à-coups de charge peuvent être ponctuels (dépotage de matières de vidange, activité industrielle ...) ou récurrents, par exemple l'arrivée d'un flux de population. A travers quelques exemples, nous allons voir comment *efstep* gère ces différents cas :

Cas d'à-coups de charge ponctuels modérés :

Le premier exemple est un dépotage ponctuel de matière de vidange les 14 et 15 avril sur la station de Villefranche de Lauragais. Comme le montre la figure 14, DISTEP positionne parfaitement cet événement sur le calendrier du mois d'avril et le profil d'oxygène correspondant marque très clairement la survenue d'un événement anormal. DISTEP indique cet événement par la phrase : "forte charge /capacité biologique" sur fond rouge et la conséquence par la phrase "élimination du NH4 incomplète" sur fond orange. La journée du 15, nous observons effectivement 100% de motifs plateaux ! La journée du 16, la présence de trois motifs plateaux-pics indique une élimination totale du NH4 dans le bassin biologique. Par conséquent la station a encaissé rapidement cet événement anormal. DISTEP indique un retour à la normale par des cases sur fond vert. Remarque : la journée du 15, nous pouvons supposer une fuite en NH4 mais nous n'en connaissons pas l'intensité et quoi qu'il en soit, la couleur du message reste orange car c'est la première journée où DISTEP constate une fuite. Côté automate station, à noter l'adaptation de la durée d'aération à la charge entrante par l'algorithme INFLEX. Les créneaux d'aération (en vert) montrent que pendant toute la durée du pic de charge l'aération fut maximale et cette adaptation a permis de limiter les fuites d'ammonium.

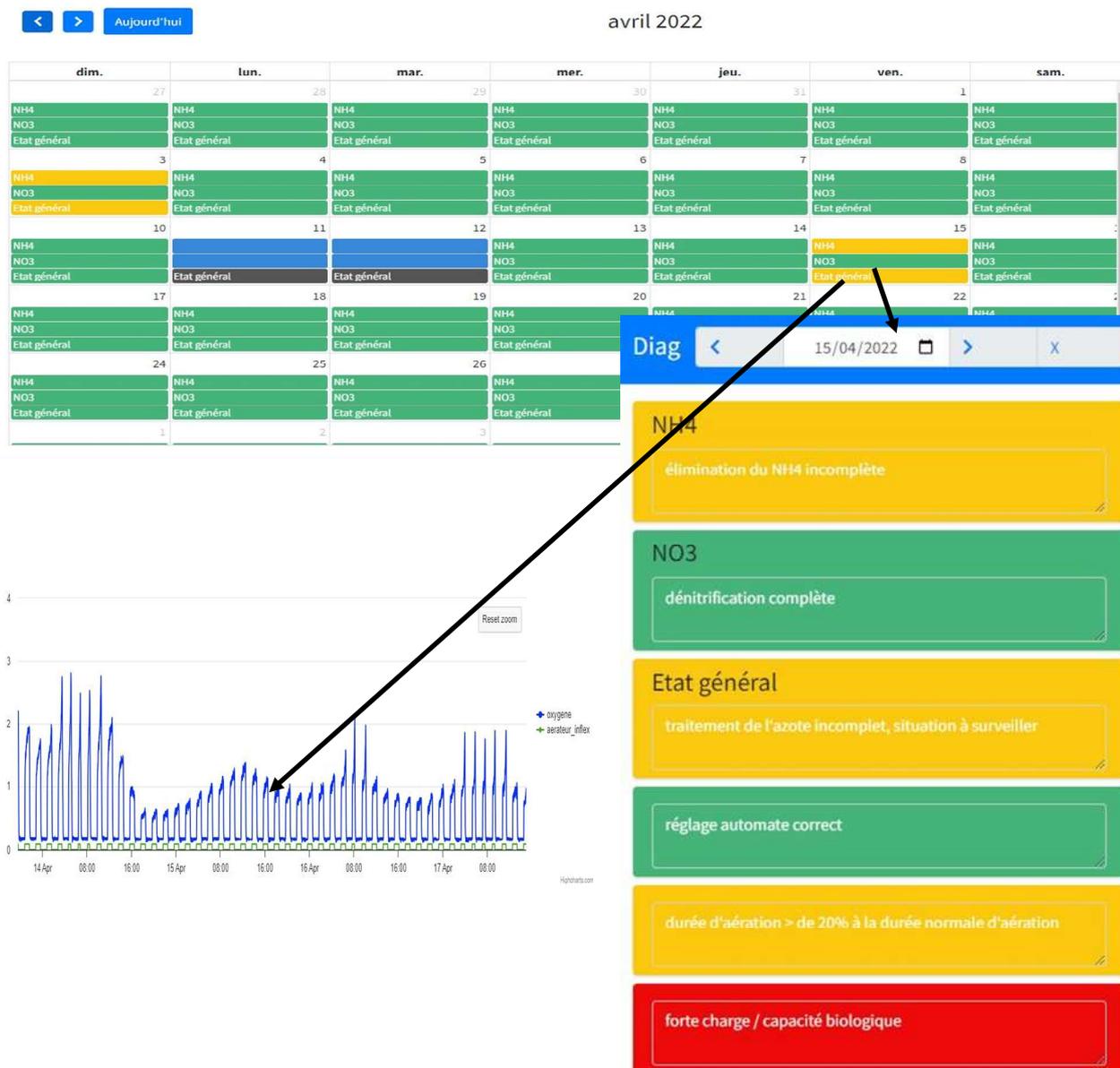


Figure 14 - cas d'un dépotage de matières de vidange sur la station de Villefranche de Lauragais.

Il peut arriver qu'un dépotage contenant une forte concentration en matières grasses induise d'autres conséquences sur le fonctionnement de la station. La figure 15 montre les conséquences du traitement d'un bac à graisse, phénomène observé sur la station de St LARY SOULAN. La journée du 13 juin, l'injection du bac à graisse de la station, dans le bassin biologique induit d'une part un petit à-coup de charge (clairement visible sur les variations de l' O_2) et d'autre part une modification du transfert d'oxygène. Il en résulte qu'INFLEX ne repère plus (ou difficilement) le point α . De ce fait, l'aération est coupée trop tard et la station de toute évidence trop aérée. La journée du 16 juin, DISTEP repère ce fonctionnement non optimal d'un point de vue énergétique et préconise d'ajuster le paramétrage d'INFLEX en

précisant le critère O₂. C'est ce qui est fait par l'exploitant la journée du 17 juin. Le 18 juin, la station revient à un fonctionnement optimal.

Cet exemple montre clairement la complémentarité entre Inflex et Distep : Inflex est dans son rôle de pilotage optimisé de la station mais Distep qui analyse les profils O₂ selon une autre méthodologie s'aperçoit qu'un événement a modifié le milieu réactionnel et déplacé le point de fonctionnement optimal ! Il préconise alors à juste titre de re-paramétrer Inflex pour retrouver ce fonctionnement optimal.



Figure 15 – traitement d'un bac à graisses

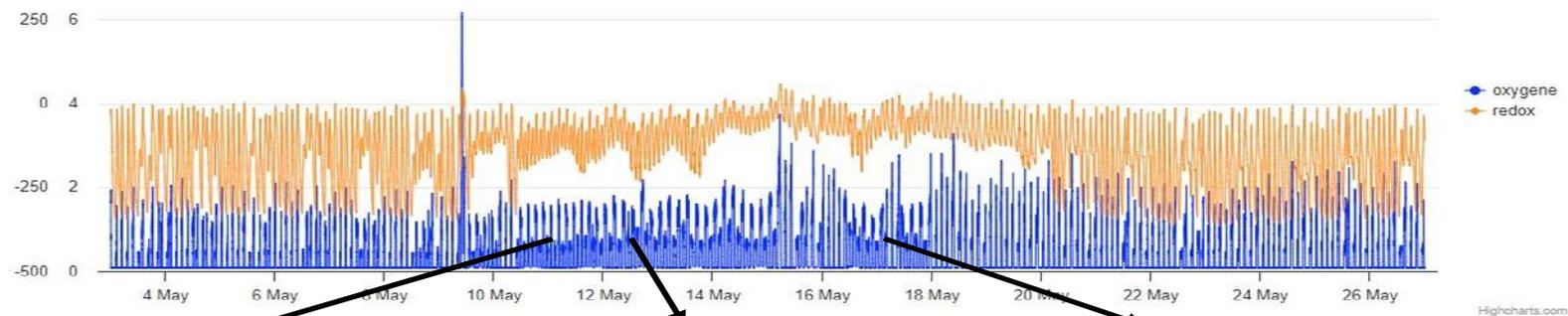
Cas d'à-coups de charge significatif mais ponctuel, notion de récursivité :

Dans ce type de situation, une charge anormalement élevée arrive sur la station pendant plusieurs jours successifs. C'est le cas par exemple du traitement d'une partie des boues stockées pendant la période du COVID sur la station de ST Paul sur Save (figure 16 ci-dessous).

Pendant une semaine, une unité mobile de déshydratation des boues à renvoyé dans le bassin biologique un lixiviat fortement chargé en ammonium.

Le 11 juin, DISTEP détecte cet évènement anormal et identifie une forte charge par rapport à la capacité biologique de la station. Il diagnostique alors une fuite en NH_4 , le message suivant apparaît sur fond orange : *"élimination du NH_4 incomplète"*. Le même diagnostic se reproduit le lendemain, DISTEP alerte alors l'exploitant par un message sur fond rouge : *"élimination du NH_4 à nouveau incomplète" "situation critique"*. La notion de récursivité apparaît ici : il n'y a alerte que lorsque un événement "grave" se produit deux jours de suite. Si nécessaire et, c'est le cas ici, DISTEP émet une recommandation pour solutionner le problème le plus rapidement possible, ici le re-paramétrage d'INFLEX : *"la durée d'aération journalière est insuffisante pour assurer une nitrification complète : je vous propose d'augmenter cette durée en diminuant le critère durée_coupure_air_max"*.

Cet exemple illustre la complémentarité entre INFLEX et DISTEP : lorsque la charge augmente de manière significative, INFLEX augmente la durée d'aération jusqu'au maximum prévu par le paramétrage de l'algorithme. Si l'augmentation de charge se prolonge, DISTEP qui analyse le fonctionnement de la station dans son ensemble alerte l'exploitant de cette situation et le conseille pour un éventuel ajustement du paramétrage d'INFLEX. Bien évidemment, en fonction de la situation l'exploitant peut suivre ou pas ces conseils.



Diag < 11/05/2022 > X

NH4
élimination du NH4 incomplète

NO3
dénitrification complète

Etat général
traitement de l'azote incomplet, situation à surveiller

réglage automate correct

durée d'aération > de 20% à la durée normale d'aération

forte charge / capacité biologique

Diag < 12/05/2022 > X

NH4
élimination du NH4 à nouveau incomplète

NO3
dénitrification complète

Etat général
situation critique

réglage automate sans doute non optimal, voir les commentaires

durée d'aération > de 20% à la durée normale d'aération

forte charge / capacité biologique

Si le niveau de rejet en NH4 n'est pas conforme, plusieurs type d'actions sont envisageables :

la durée d'aération journalière est insuffisante pour assurer une nitrification complète : je vous propose d'augmenter cette durée en diminuant le critère durée_coupure_air_max

Diag < 17/05/2022 > X

NH4
très bonne élimination du NH4

NO3
dénitrification incomplète, accumulation de NO3 dans le B.A.

Etat général
situation critique

réglage automate correct

durée d'aération > de 20% à la durée normale d'aération

charge normale / capacité biologique

la dénitrification est incomplète. Pour favoriser l'élimination des nitrates, en fonction du contexte et de votre niveau de rejet en nitrates, vous pouvez augmenter le critère durée_coupure_air_sous_charge et dans certains cas le critère durée_coupure_air_max

Figure 16 - exemple de comportement d'e/step dans le cas d'un à-coup de charge significatif. Cas du traitement d'une partie des boues stockées pendant la période du COVID sur la station de ST Paul sur Save

4. Détection et gestion d'un dysfonctionnement (panne d'aérateurs)

C'est un événement que nous avons observé sur la station de Villefranche de Lauragais (voir figure 17 – mois de juin 2022). Ce type de situation engendre une importante accumulation de NH₄. La réponse *efstep* est la même que celle correspondant à un à-coup de charge significatif.

Les 17, 18 et 19 juin, DISTEP détecte une anomalie "physique" prolongée du système, puisque pendant ces 3 jours, les signaux O₂ et rédox ne sont pas interprétables (code bleu). Cette anomalie correspond en réalité à un problème de transmission d'ordre de mise en marche entre INFLEX et les aérateurs (absence de profils). DISTEP envoie un message précisant qu'il n'est pas en mesure de diagnostiquer l'état de fonctionnement (16 au 19 décembre, cases bleues sur le calendrier). Une fois le problème solutionné, le 20 juin, DISTEP détecte à juste titre une fuite de NH₄. Le message suivant apparaît sur fond orange : *"élimination du NH₄ incomplète"*. Le même diagnostic se reproduit le lendemain, DISTEP alerte alors l'exploitant par un message sur fond rouge : *"élimination du NH₄ à nouveau incomplète" "situation critique"*. Si nécessaire et c'est le cas dans cet exemple, DISTEP émet une recommandation pour solutionner le problème le plus rapidement possible : *"la durée d'aération journalière est insuffisante pour assurer une nitrification complète : je vous propose d'augmenter cette durée en diminuant lecritère durée_coupure_air_max"*. Ce critère est un des paramètres de l'automate INFLEX.

Cet exemple montre la complémentarité entre INFLEX et DISTEP : lorsque la charge augmente de manière significative, INFLEX augmente la durée d'aération jusqu'au maximum prévu par le paramétrage de l'algorithme. Si l'augmentation de charge se prolonge DISTEP qui analyse le fonctionnement de la station dans son ensemble alerte l'exploitant de cette situation et le conseille pour un éventuel ajustement du paramétrage d'INFLEX. Bien évidemment, en fonction de la situation l'exploitant peut suivre ou pas ces conseils.

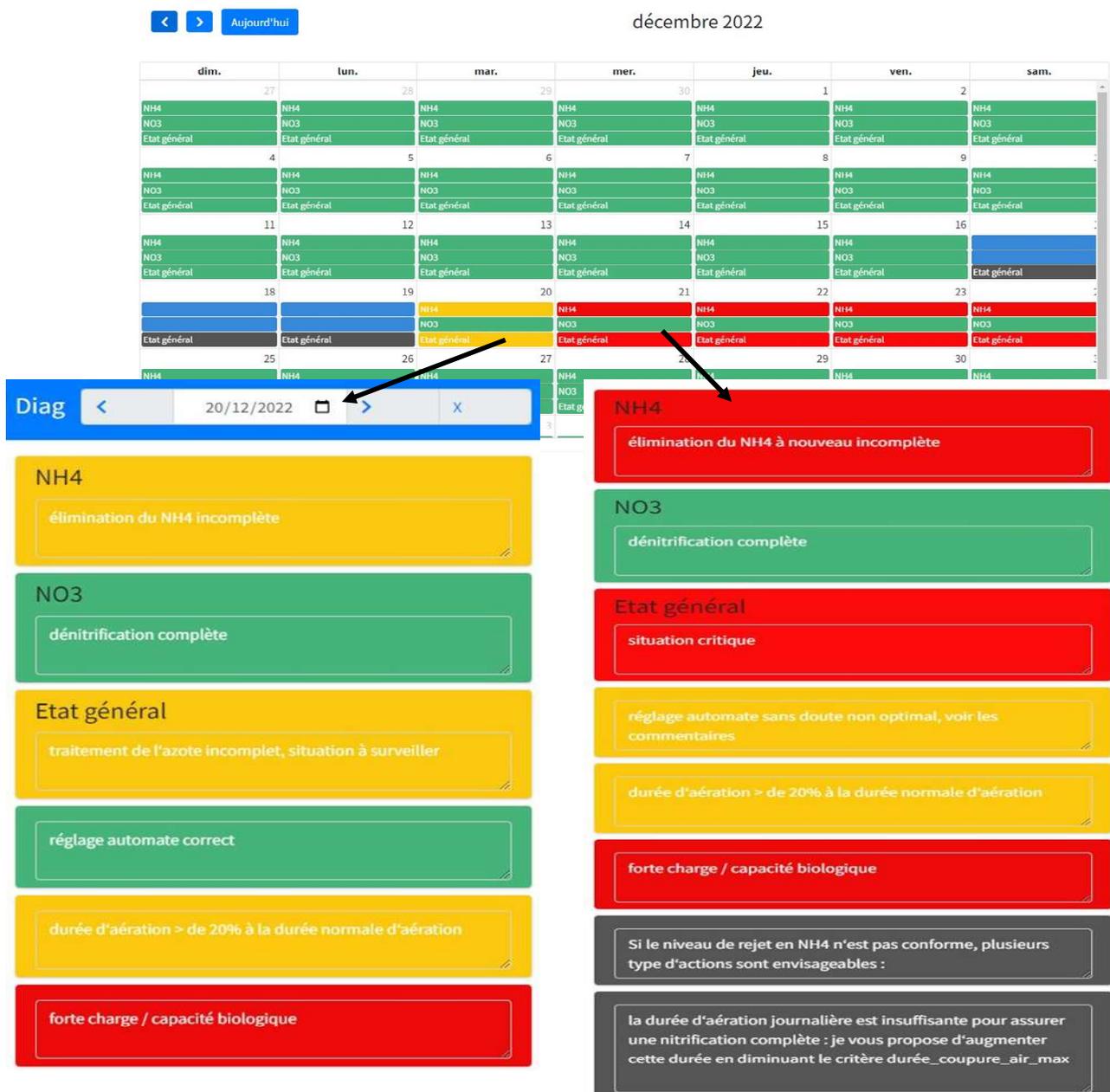
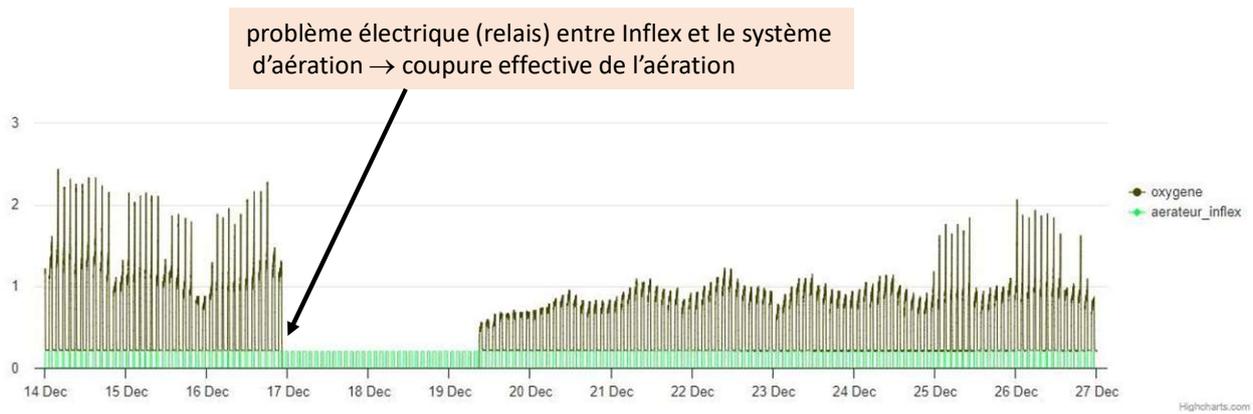


Figure 17 - exemple de comportement d'efstep dans le cas d'un à-coup de charge significatif. Situation causée par une importante accumulation de NH4 suite à une panne du système d'aération. Station de Villefranche de Lauragais.

5. Détection et gestion d'un changement de charge durable

Par changement de charge durable, nous entendons une augmentation (voire forte augmentation) de la pollution à traiter. C'est le cas de stations qui subissent l'influence du tourisme. Parmi les stations à l'étude, c'est le cas de la station de St LARY SOULAN impactée l'hiver (vacances de fin d'année et de ski) et l'été (surtout le mois d'Août).

La figure 18 illustre le fonctionnement e/step sur la station de St Lary SOULAN pendant les vacances d'hiver 2023 (mois de février). C'est une configuration d'exploitation particulièrement délicate à gérer : forte charge à traiter dans de conditions de basses températures. A cette occasion le traitement s'effectue sur deux files. Nous avons volontairement choisi la période la plus extrême : un Week-End avec deux zones de vacances scolaire.

Remarque très importante : sur toute cette période et malgré des messages sur fond rouge, la station à toujours répondu aux normes de rejet à savoir, sur un bilan 24h, une sortie en Azote Global toujours < 20 mgN/L. Dans ces périodes, la stratégie consiste à maximiser autant que possible le traitement du NH4 en maintenant une fuite en NO3 non susceptible d'occasionner des problèmes de décantation (dénitrification dans le décanteur).

La journée du 9 février, DISTEP identifie une fuite récurrente en NH4 et préconise (à juste titre) une augmentation de la durée d'aération via un re-paramétrage d'INFLEX : *"la durée d'aération journalière est insuffisante pour assurer une nitrification complète : je vous propose d'augmenter cette durée en diminuant le critère durée_coupure_air_max"*.

Cette recommandation a été suivie par l'exploitant et améliore le traitement de l'azote les trois jours suivants. Le 14 février, DISTEP constate à nouveau une fuite récurrente en NH4 cependant, le message de DISTEP n'est plus le même : *"la durée d'aération journalière est insuffisante pour assurer une nitrification complète. Cependant, difficile d'augmenter ce paramètre sans nuire à la dénitrification"*. Autrement dit, la capacité de traitement maximale de la station est atteinte.

Deux jours après, le 15 février, la pollution diminue et le process arrive à traiter l'ammonium. Le message suivant est délivré par DISTEP : *"nitrification totale après une faible accumulation d'ammonium au pic de charge"*. Nous reviendrons plus tard sur l'exact signification de ce message. DISTEP émet également le message suivant : *"la dénitrification est incomplète. Pour favoriser l'élimination des nitrates, en fonction du contexte et de votre niveau de rejet en nitrates, vous pouvez augmenter le critère durée_coupure_air_sous_charge et dans certains cas le critère durée_coupure_air_max"*. Autrement dit, l'ammonium est correctement traité, il est maintenant possible de rallonger la durée de coupure d'air pour réduire totalement les NO₃.

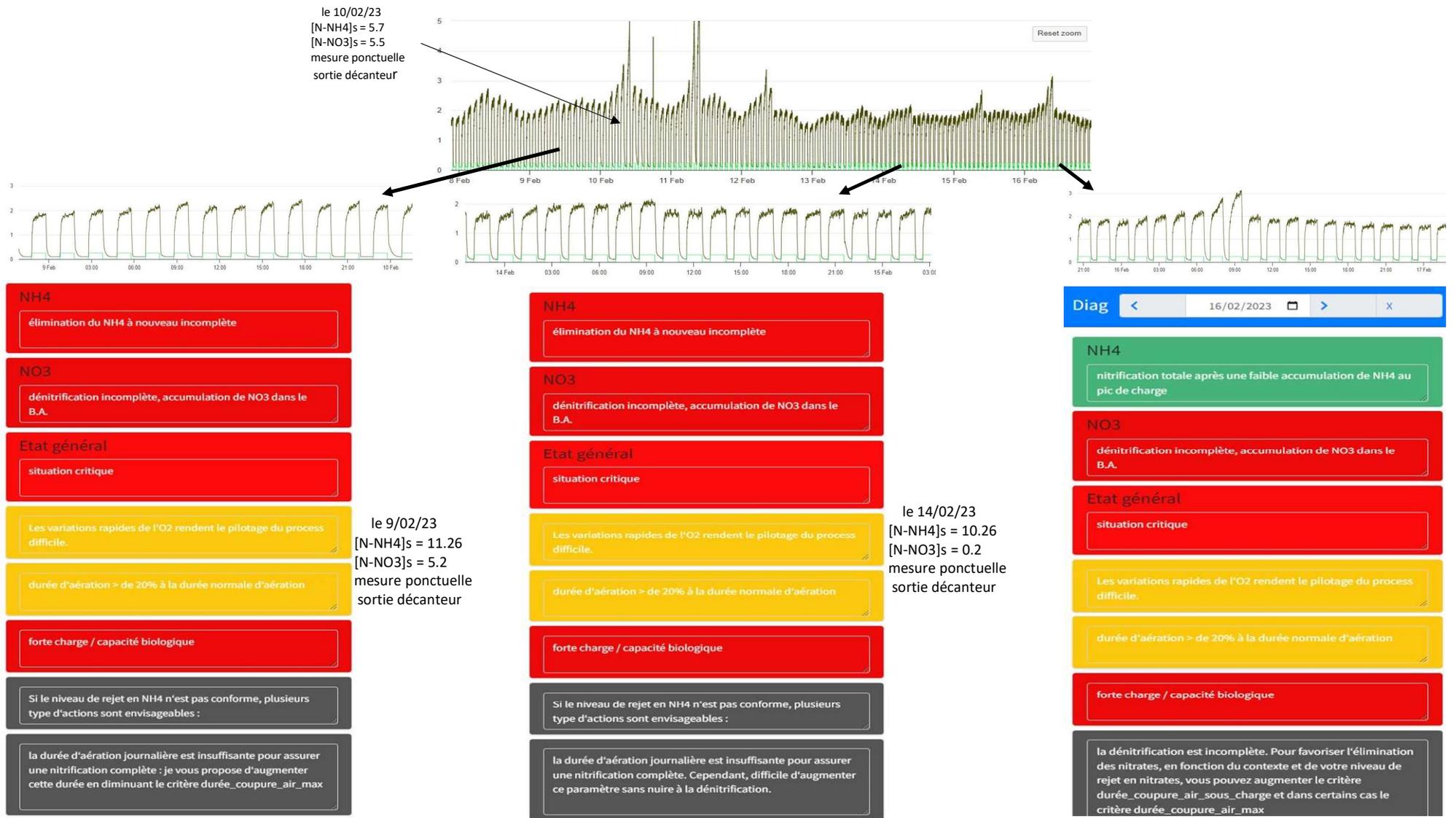


Figure 18 - exemple de gestion par e/step d'une période très fortement chargée. Vacances scolaires d'hiver 2023 sur la station de St LARY SOULAN. Pendant cette période de haute intensité, l'accent est mis sur le traitement du NH4 puis dès que cela devient possible, les nitrates sont totalement éliminés.

Malgré ces messages, comme le montre la figure 19, l'exploitant a préféré attendre le 6 Mars, date de la fin des vacances pour rallonger les périodes de coupure d'air. L'effet est immédiat, le 7 mars, le stock de nitrate a été résorbé. Le fonctionnement de la station redevient normal. Cet exemple montre encore une fois la complémentarité entre INFLEX et DISTEP. Inflex adapte la durée d'aération à la charge entrante jusqu'à une limite fixée par le paramétrage de l'algorithme. En fonction de l'évolution de la charge à traiter, DISTEP alerte l'exploitant et le conseille dans sa stratégie d'un potentiel ajustement du paramétrage d'INFLEX.

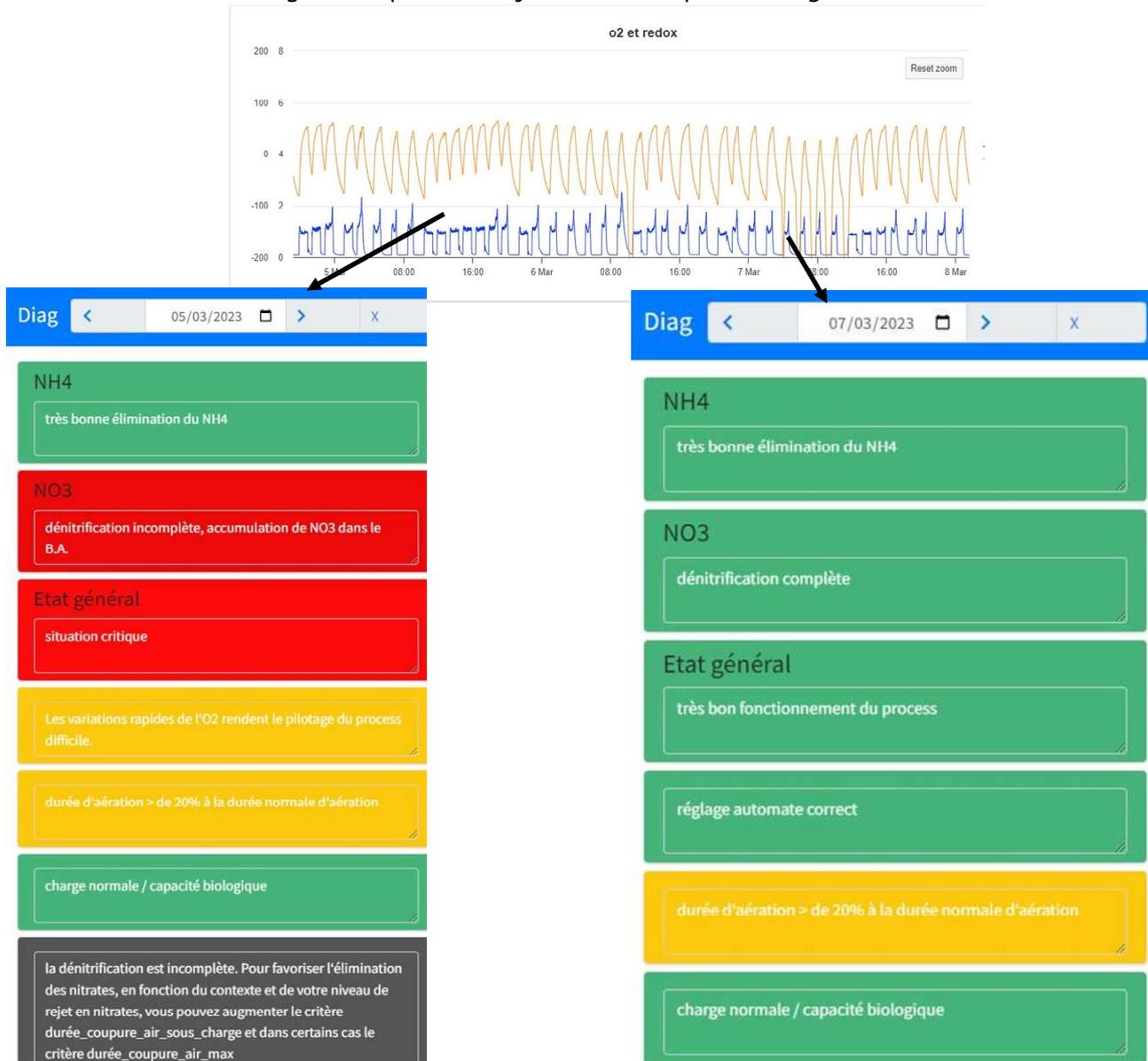


Figure 19 - effet du rallongement de la phase de coupure d'air sur le traitement des nitrates.

6. Détection et gestion d'une sous aération :

Ces situations sont majoritairement liées à un excès de boue, souvent aggravé par des températures élevées et/ou une surcharge. Il en résulte une diminution des teneurs en oxygène dissous dans le bassin biologique. Lorsque cette teneur en oxygène reste en deçà de 0,5 mg/l, la réaction biologique de nitrification est limitée, augmentant de fait la durée d'aération journalière. Le process n'est plus à son optimum énergétique. D'autre part, si ce phénomène est concomitant à une augmentation significative de la charge à traiter, la situation peut devenir critique avec d'importantes fuites en NH₄ (cas de stations balnéaires sous aérées pendant la période estivale).

C'est une problématique récurrente sur les stations de Pamiers et Langon qui ont souvent des difficultés à maintenir un taux de boues compris entre 3,5 et 4 gr/l. la station de Pamiers à cause d'une difficulté à évacuer les boues, la station de Langon à cause de multiples défaillances du système d'extraction des boues. Prenons par exemple de cas de la station de Pamiers.

La figure 20 illustre la réponse de DISTEP. Pour un fonctionnement optimal avec un taux de boue voisin de 3,5 g/L, la durée d'aération journalière est 6h. Un extrait du diagnostic pour le mois de février 2023 montre qu'effectivement la station fonctionne dans une zone d'efficacité épuratoire et énergétique.

Par contre, sur cette même station, au mois de mai 2022, les boues ont été insuffisamment purgées, plaçant progressivement le taux à 5 g/L. Il en résulte une augmentation rapide et significative la durée d'aération journalière jusqu'à un doublement de cette durée (12 h au lieu de 6 h). Les variations de l'O₂ au cours du temps montrent clairement qu'au pic de charge, la teneur en oxygène dissous reste nul. La réaction de nitrification est significativement limitée. Il est très important de noter que pendant cette période la station remplit parfaitement ses objectifs épuratoires. Elle n'est cependant pas à son optimum énergétique.

Dans tous ces cas de figure, le fonctionnement d'e/step n'a jamais été mis en défaut. INFLEX augmente la durée d'aération jusqu'au maximum prévu par le paramétrage de l'algorithme et DISTEP informe très clairement l'exploitant de la situation et des actions à mener pour retrouver une efficacité énergétique à savoir baisser son taux de boue après contrôle ou si la consigne de taux de boue est respectée, augmenter la puissance d'aération pour faire face à une surcharge de pollution

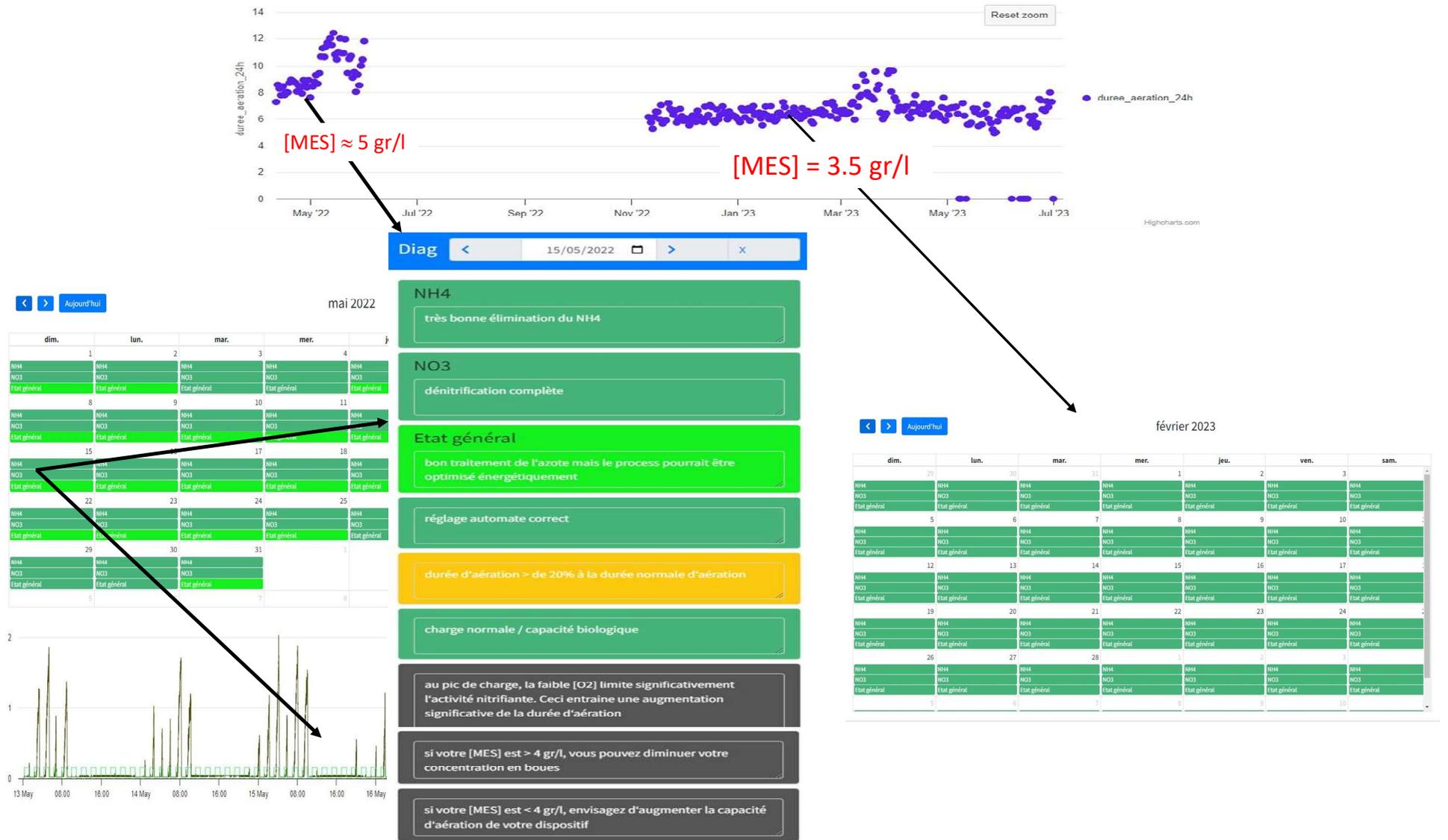


Figure 20 - Détection d'une consommation énergétique inhabituelle (ici liée à un taux de boue excessif dans le bassin biologique). Station de Pamiers

7. Détection et gestion d'une anomalie liée à une sur-aération

Dans toutes les situations de sur-aération, le transfert d'oxygène est trop voire beaucoup trop important par rapport à la demande biologique en oxygène. Ces situations peuvent avoir une origine structurelle. Elles se rencontrent fréquemment sur des stations récentes donc très sous-chargées et de fait avec un système d'aération sur-dimensionné.

Les autres cas de sur-aération sont dus à une demande biologique en O₂ anormalement faible qui peut s'expliquer par de faibles concentrations en boue (< 3 gr MES/l) et/ou de faibles charges de pollution à traiter.

Remarque importante : les faibles températures amplifient les états de sur-aération, en limitant l'activité biologique et en favorisant le transfert d'oxygène,

La figure 21 montre comment *efstep* se comporte dans le cas d'une purge de boue massive entraînant une situation de sur-aération. C'est le cas de la station de St LARY SOULAN fin juin 2023. L'objectif était d'abaisser drastiquement le taux de boue pour préparer la saison estivale. La purge de boue commence le 26 juin. Auparavant (par exemple le 23 juin), le fonctionnement de la station est en tout point optimal. Trois jours après le début de la purge (le 29 juin), les variations de l'O₂ ont considérablement changé. Les motifs plateaux-pics très distinct ont été remplacés par des motifs de variations rapides de l'O₂ et DISTEP identifie parfaitement cette situation "*diminution du rapport (demande biologique en O₂ / puissance d'aération)*". Ceci peut s'expliquer par une extraction récente de boue ou une augmentation de la puissance d'aération" et en tire (à juste titre) les deux conséquences essentielles : un diagnostic incertain "*Le NH₄ est sans doute bien éliminé mais ce diagnostic est délicat. Diagnostic à vérifier par une analyse*" et un système difficile à piloter "*quelques coupures trop rapides de l'aération dues à un système difficile à piloter*". Au final, un message indiquant une situation à surveiller.

La purge s'étant terminée le 30 juin, le 4 juillet, la présence de motifs plateaux_rampants-pics montrent que le bassin biologique se ré-équilibre. Il n'y a plus d'incertitude sur le diagnostic mais DISTEP souligne à juste titre que le rapport "*demande biologique en O₂ / puissance d'aération*" continue à être inférieur à la normale. Le 7 juillet, tout est redevenu normal.



Figure 21 - séquence d'une purge de boue massive entraînant une situation temporaire de sur-aération. Station de St LARY

Lorsque la concentration en boue est très faible ($< 2,5\text{g/L}$) dans une période de très faible charge et de basse température (Exemple de la mise en route de la seconde file sur la station de Saint LARY figure 22 ci-dessous), le rapport "demande biologique en O₂ globale / puissance d'aération" est tellement faible que les variations de l'O₂ sont extrêmement rapides.

Dans tous ces cas de figure et quel que soit leur intensité, le pilotage de la station est délicat. Comme le montre la figure 22, si DISTEP identifie ces cas sans problème avec des messages du type : " la puissance d'aération est beaucoup trop importante par rapport à l'activité biologique. Le système est très difficile à piloter. " ou " fonctionnement correct mais des remontées rapides de l'O₂ montrent que globalement la puissance d'aération est élevée par rapport à l'activité biologique ", le diagnostic qui est alors exclusivement basé sur l'analyse de la décroissance de l'O₂ après coupure de l'air est toujours et à juste titre assorti d'une incertitude avec des messages du type : "élimination du NH₄ sans doute incomplète mais ce diagnostic est délicat. Diagnostic à vérifier par une analyse" ou "Le NH₄ est sans doute bien éliminé mais ce diagnostic est délicat. Diagnostic à vérifier par une analyse". Bien évidemment, l'exploitant agira en fonction de sa connaissance de la situation.

En résumé, toutes les situations où l'O₂ varie très rapidement après la mise en route de l'aération sont toujours clairement identifiées par DISTEP avec un diagnostic à valider par des analyses terrain. Le pilotage de la station est quant à lui très délicat et demande la plus grande attention de la part de l'exploitant. DISTEP propose systématiquement deux pistes d'amélioration : si possible augmenter le taux de boue et/ou diminuer la puissance d'aération. Concernant le pilotage de l'aération par Inflex, un ajustement des paramètres de l'algorithme est souvent nécessaire et dans les cas extrêmes, un recours temporaire à une table de temps est conseillé.

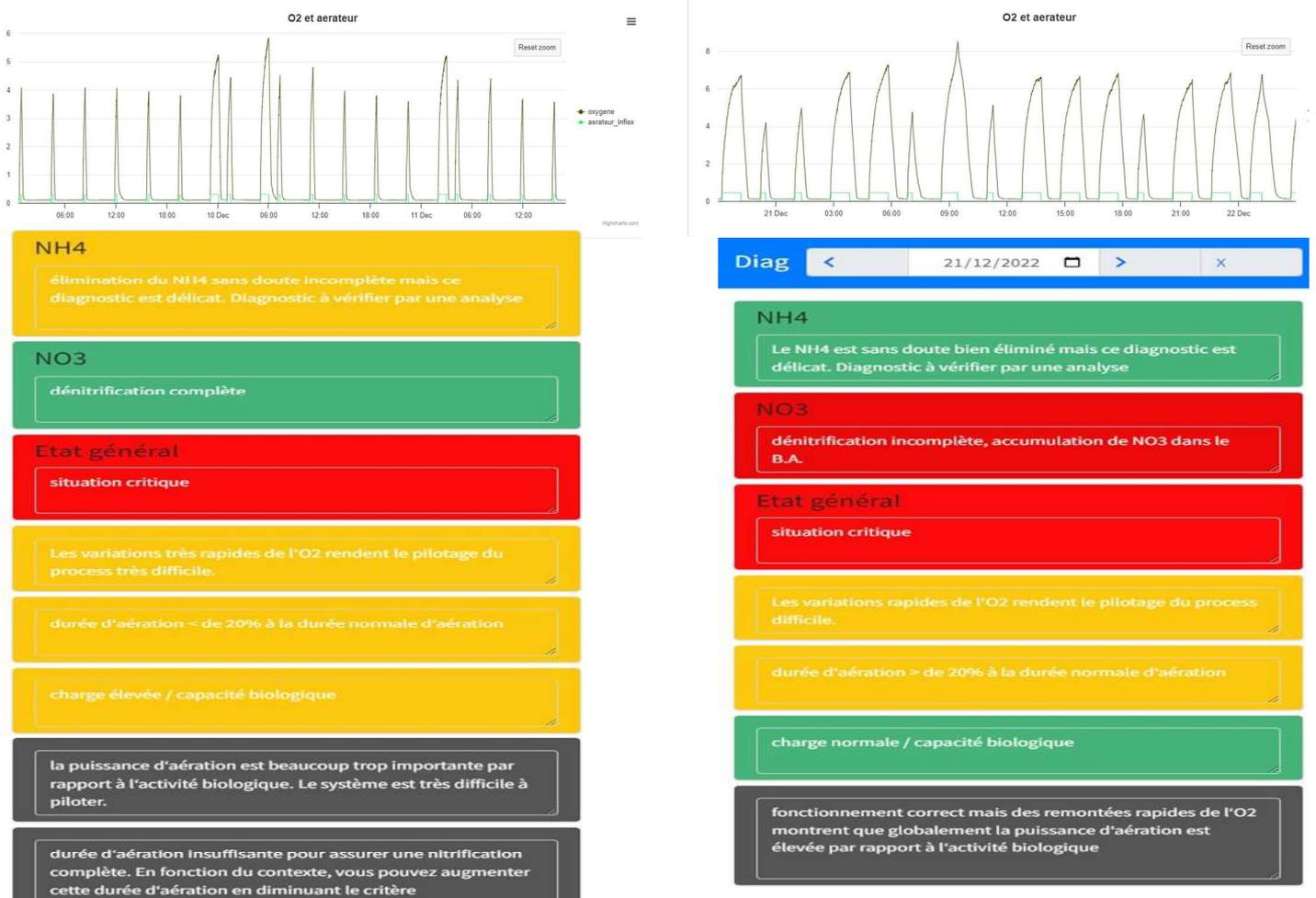


Figure 22 - conjonction d'une concentration en boue très faible 2,5g/L dans une période de très faible charge et de basse température. ST LARY SOULAN décembre 2022.

Lot 5. Retour des exploitants des stations équipées

D'un entretien régulier avec les cinq exploitants des cinq sites étudiés, il ressort les points suivants :

- Sur toute la période étudiée (janvier 2022 – octobre 2023), DISTEP n'a jamais été mis en défaut. Le diagnostic a toujours été cohérent. Sur la station de Saint Lary, une station particulièrement instable et très compliquée à gérer, l'exploitant a même été surpris par la qualité du diagnostic.

Deux remarques cependant :

Première remarque : dans les périodes où la concentration en boue est très faible (< 2.5g/L) ou la pollution à traiter est très faible ou les deux combinés, l'oxygène varie très rapidement et le diagnostic devient aléatoire. Il doit être confirmé par des analyses. Ce phénomène a clairement été observée sur la station de St LARY lors des inter saisons hivernale et lors du passage en double file. Quel que soit le site, c'est également le cas lorsque l'exploitant extrait des boues plus que de raison en particulier pendant des périodes froides.

Seconde remarque : l'expérience montre très clairement et notamment dans des situations de sur-charge que DISTEP dispense un diagnostic qualitatif. La couleur **rouge** alerte toujours à juste titre l'exploitant d'une situation critique comme une fuite en NH4 ou NO3. Cependant comme nous le constatons sur la station de St LARY, cela ne signifie pas que cette fuite est supérieure à la norme. Cette alerte doit donc être suivie d'un contrôle de l'exploitant pour vérifier la situation.

- Il ressort que DISTEP est d'autant plus consulté que la station est difficile à gérer. L'objectif est de comprendre des situations anormales ou conforter sa propre analyse d'une situation. De l'avis de tous, DISTEP est un excellent outil de compréhension du système. Certains parlent d'une fonction pédagogique. Il a été aussi remonté une amélioration nécessaire de la syntaxe et sémantique de certains messages pour en faciliter la compréhension objective.
- Il ressort très clairement que le couple INFLEX- DISTEP apporte un grand confort et sécurise l'exploitation. Comme le dit Mr SOULA exploitant de la station de LANGON : "c'est un aiguillage pour les personnes peu expérimentées et un filet de sécurité pour les personnes expérimentées".
- Une remarque pertinente nous a été faite : DISTEP assure une continuité de service ou de compétence lorsque l'exploitant habituel est absent.

8. Conclusions et suites

Résultats marquants

5 stations d'épuration ont été soumises pendant presque 2 ans au diagnostic généré par le logiciel DISTEP. Il a été confronté à tous les états possibles de fonctionnement d'un bassin biologique d'une station et a répondu avec succès. Au-delà de la maîtrise de la qualité du rejet, il en résulte des économies d'électricité qui peuvent s'avérer très importantes : 100 000 Kwh/an sur la station de Pamiers (09), 273 500 Kwh/an sur la station de Langon (33).

Il est possible d'expliciter les potentialités mais également les limites de la solution e/STEP :

- Principe : en fonction de l'ensemble des paramètres et contraintes de fonctionnement d'un site, l'exploitant place le bassin biologique à un point d'efficacité épuratoire par un réglage optimal du taux de boue, de la puissance d'aération et du syncopage de l'aération. En parallèle, au travers des signaux O₂ et REDOX, DISTEP analyse en temps réel le process dans sa globalité, vérifie la position du fonctionnement actuel vis-à-vis de la position d'équilibre optimale et signale un écart à l'exploitant le cas échéant.
- Dans tous les cas où la puissance d'aération est correctement dimensionnée par rapport à la demande biologique du système, le couple INFLEX-DISTEP fonctionne parfaitement, n'est jamais mis en défaut et les conseils de pilotage sont toujours très pertinents. L'approche de récursivité mise en place permet d'informer l'exploitant à bon escient et évite l'émission d'alertes intempestives. Deux catégories de stations ont été expertisées :
 - La station présentant une fluctuation de charge conventionnelle avec des à-coups de charge courts dans le temps (ex : dépotage). C'est la station la plus répandue et également la plus fréquente dans le panel des stations suivies (Villefranche, Pamiers, Saint Paul, Langon). INFLEX optimise le syncopage de l'aération et DISTEP assure une veille du process. Lorsque des incidents surviennent, les messages délivrés sont toujours pertinents. Il est en de même lorsque le système dérive lentement, par exemple lorsque l'on s'éloigne de l'optimum énergétique souvent lié à une augmentation du taux de boue et/ou une augmentation des températures. A noter que les cas de sous-aération à l'origine d'une potentielle limitation des réactions biologiques sont parfaitement détectés et analysés.
 - La station soumise à de fortes variations de charge, souvent lié à un contexte touristique (cas de Saint Lary). Si la puissance d'aération est toujours bien dimensionnée, le couple INFLEX-DISTEP s'avère très performant, même indispensable. Dans tous ces cas, INFLEX adapte en permanence l'aération à la pollution à traiter et DISTEP informe au jour le jour l'exploitant de l'état du système avec des conseils toujours judicieux sur des modifications du paramétrage d'INFLEX, sur la gestion du taux de boues et de la puissance d'aération.
- Dans tous les cas où la puissance d'aération est sur-dimensionnée par rapport à la demande biologique du système et qu'il n'est pas possible d'adapter cette puissance, le pilotage de l'aération par INFLEX est délicat. DISTEP détecte cette situation demande toujours une confirmation du diagnostic par une analyse. Cette situation a été rencontrée dans le cas de la station de Saint Lary (période hivernale, extraction excessive de boue). DISTEP propose des recommandations et en dernier recours (cas extrêmes) un paramétrage temporaire d'INFLEX en mode horloge peut être envisagé. Ces cas sont malgré tout peu fréquents. Il peut s'agir par exemple de nouvelles stations mises en service, dont la charge est faible et la puissance d'aération installée inadaptée et inadaptée.

Les fonctionnalités et applications de la solution e/STEP sont multiples. Selon la complexité du process, la volonté et la compétence des exploitants, les contraintes spécifiques, tout ou partie

de ces fonctionnalités pourront être utilisées. Sur une station de taille importante disposant de personnel compétent sur place, la principale préoccupation sera certainement la recherche de l'efficacité énergétique. Sur une station isolée, l'utilisation de la fonction pilotage & diagnostic à distance constituera le principal intérêt de la solution.

Domaine d'application

La solution *efstep* s'applique à tous les procédés qui traitent simultanément le carbone l'azote et le phosphore dans un mono-bassin (infiniment mélangé) par alternance de phases aérées et non-aérées. La taille du bassin ou sa géométrie (chenal, cylindrique, rectangulaire) n'affecte pas l'applicabilité de la solution, il suffit que les capteurs soient positionnés de telle manière que les signaux produits soient représentatifs.

Ces procédés sont

- la boue activée, c'est le cas de la plupart des stations,
- le procédé SBR (Sequencing Batch Reactor). Dans ce cas, après chaque remplissage d'eau à traiter, *efstep* pilote l'aération sur le même principe. Les apports d'effluents doivent être gérés de manière à conserver un maximum de DCO pour la dénitrification.
- le BRM, (bioreacteur à membrane)

Le traitement de l'azote est lié à la composition de l'eau usée et en particulier au rapport DCO/N. La solution *efstep* a été largement validée dans un domaine de rapport DCO/N allant de 10 à 16, la DCO étant majoritairement biodégradable. Cette solution a été éprouvée avec succès pour des eaux usées dont le rapport DCO/N est déséquilibré. Ce déséquilibre peut venir d'une proportion plus importante d'ammonium (ex : eaux usées d'aires autoroutes) ou d'une fraction importante de DCO dure (ex : digestat de boue). La solution *efstep* intègre une fonction d'apport en DCO pour rééquilibrer ce rapport DCO/N et assurer une dénitrification poussée. L'apport en DCO est assuré par une pompe pilotée par l'algorithme INFLEX.

Enfin la solution *efstep* a été validé dans un domaine de charge azotée volumique comprise entre 0,01kgN/m³/j et 0,05 kgN/m³/j. Pour des charges supérieures à 0,05 kgN/m³/j, une analyse préliminaire de la station et de l'effluent entrant sera nécessaire avant d'envisager l'implantation d'*efstep*.

Livrables et indicateurs de réussite

Les livrables prévus ont tous été produits :

- Un code source pour le traitement des données
- Une application web pour le code source (<https://www.distep.fr/>)
- Un rapport d'étude technique
- Un rapport sur les modalités de commercialisation de l'outil (fourni par Toulouse Tech Transfert « Rapport de valorisation LOT 5 distep »)

Le programme a également permis de développer un nouvel automate INFLEX incluant des fonctionnalités lui permettant de se connecter à une application WEB.

Les indicateurs de réussite sont :

- L'écart entre le diagnostic et l'état observé de la station : sur la période d'observation janvier 2022 – octobre 2023, DISTEP n'a jamais été mis en défaut. Le diagnostic a toujours été cohérent.
- Le retour des exploitants impliqués dans la démonstration : positif (voir Lot 5. Retour des exploitants des stations équipées)

- L'avis d'un tiers expert Office International de l'Eau :

le système Distep a été utilisé pendant 6 mois sur la steu qui équipe le centre de formation de l'OIEau à la Souterraine. Cette steu de 220 EH est une boue activée faible charge, elle est équipée de technologie Inflex depuis 2015.

Notre avis sur la technologie distep :

"Efficace. Basée sur la technologie Inflex, elle permet de fiabiliser le rejet des Steu de taille modeste et d'optimiser la consommation énergétique des Steu de taille plus importante.

Facile à mettre en place. Le passage d'Inflex à Distep n'a pas posé de problème particulier. L'installation a demandé environ 1 journée de travail notre Steu. Le procédé Distep peut être équipé d'une carte SIM pour permettre le transfert des données qu'il collecte vers le serveur externe. L'utilisation d'une carte SIM permet de pallier au manque de maturité des services d'eau et d'assainissement à assurer la sécurité informatique des installations.

Compense le manque de suivi des steu. Pour diverses raisons, il nous semble que les Steu ne sont pas suffisamment suivies. Distep, permet de compenser un manque d'exploitation.

Facile à acquérir : Cette technologie n'a pas été développée et ne devrait pas être distribuée par une société étiquetée « entreprise traiteur d'eau ». Que ce procédé soit distribué par un industriel indépendant peut faciliter sa diffusion et rassurer certains acquéreurs.

Amélioration possible : Pour faciliter la consultation du diagnostic et éviter d'avoir besoin de consulter un serveur externe, l'intégration de Distep à la supervision serait un plus."

Diffusion, communication et formation

La communication a été mesurée. L'objectif était de faire connaître l'outil et les potentialités sans en dévoiler le mode de fonctionnement pour garantir un possible transfert vers une entreprise intéressée le moment venu. Ce projet et cette thématique ont fait l'objet de communications dans des congrès nationaux :

- Journées d'Informations Eaux, Poitiers, 11 – 13 octobre 2022 : « La solution DISTEP, pour un diagnostic en ligne au service de l'optimisation et la fiabilisation du traitement biologique des eaux résiduaires »

- Congrès ASTEE, Nice, 5 -8 juin 2023 : « DISTEP, un service pour une gestion territoriale des installations de traitement des eaux usées »

L'OIEAU a présenté le projet DISTEP lors des formations "épuration" sur le site de la Souterraine dont la station boue activée est équipée de la solution d'efstep.

Les formations SF006 (optimisation de l'aération et de la déphosphatation) et stage SF050 (coûts d'exploitation en station) font référence à ces solutions de pilotage et d'optimisation dont DISTEP et INFLEX.

Il est enfin prévu une présentation de la solution à l'occasion du réseau thématique assainissement de l'agence de l'eau Adour Garonne qui aura lieu le 21/12/23

Transfert et commercialisation

La solution e/step a fait l'objet de dépôt de protection. Dans le cadre de ce projet, courant 2023, Toulouse Tech Transfer (TTT), structure de valorisation de l'INSA et de l'IMT, a réalisé une étude de marché et d'identification d'entreprises susceptibles d'être intéressées par la solution technologique. Cette étude a fait l'objet d'un document confidentiel intitulé « Rapport de valorisation LOT 5 distep » et fourni à l'agence de l'eau Adour Garonne.

In fine, la société BIOTRADE a été retenue et un contrat de licence a été signé entre TTT et la société BIOTRADE pour l'exploitation commerciale dans le domaine des stations d'épuration traitant les eaux usées domestiques.

Perspectives

La solution e/step, bien qu'opérationnelle et répondant à l'objectif d'efficacité énergétique et épuratoire, peut encore être perfectionnée et complétée pour répondre aux attentes des exploitants (ajustement automatique de la puissance d'aération, auto-paramétrage d'automate INFLEX via DISTEP).

Des réflexions sont en cours pour élaborer des solutions complémentaires e/step pour l'optimisation du traitement du phosphate incluant les déphosphatations biologiques et physico-chimique. Le projet PhosTwin est en cours de construction. Il s'agit de développer une modélisation réduite, qui conserve des lois physiques et biologiques mais simplifiée afin de proposer une approche de simulation et contrôle en temps réel. L'utilisation des données permettra à la fois d'estimer des variables non mesurées pour diagnostiquer l'état de fonctionnement et de guider vers des optimums opérationnels comme par exemple la réduction des concentrations en phosphore mais aussi la réduction des dépenses associées (consommation d'énergie, coûts des ajouts de réactifs chimiques en complément de la biologie). L'optimisation devra être faite sous la contrainte que l'azote continue à être traité aussi complètement que possible. Cette modélisation permettra de proposer un code de pilotage en temps réel de station d'épuration, ayant pour vocation à être testé en conditions opérationnelles. Ce module pourrait être intégré à la solution e f STEP.

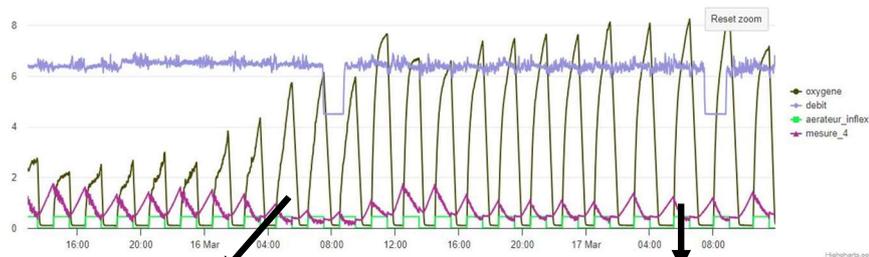
Annexe 1

Exemples de diagnostic sur la station OIEau

Cas d'une sur-aération :

Grace à l'acquisition en ligne du NH₄, il est possible de suivre ce qui se passe lors d'une sur-aération. Celle-ci a été provoquée par une augmentation du débit d'air le 16 mars. Comme le montre la figure 1, cette sur-aération entraîne des remontées rapides de l'O₂, les points alpha sont masqués. INFLEX coupe l'air au bout de la temporisation maximale d'aération.

L'ensemble des phrases éditées montre que DISTEP identifie parfaitement cette situation de sur-aération. D'autre part, le diagnostic produit s'avère juste : "le NH₄ est sans doute bien éliminé" cependant et à juste titre en pareille circonstances, il doit être vérifié par une analyse terrain : "mais ce diagnostic est délicat. Diagnostic à vérifier par une analyse".



Diag < 16/03/2023 > X

NH₄
Le NH₄ est sans doute bien éliminé mais ce diagnostic est délicat. Diagnostic à vérifier par une analyse

NO₃
dénitrification complète

Etat général
bon fonctionnement du process

Les variations rapides de l'O₂ rendent le pilotage du process difficile.

durée d'aération > de 20% à la durée normale d'aération

charge normale / capacité biologique

fonctionnement correct mais des remontées rapides de l'O₂ montrent que globalement la puissance d'aération est élevée par rapport à l'activité biologique

Diag < 17/03/2023 > X

NH₄
Le NH₄ est sans doute bien éliminé mais ce diagnostic est délicat. Diagnostic à vérifier par une analyse

NO₃
dénitrification complète

Etat général
bon fonctionnement du process

Les variations rapides de l'O₂ rendent le pilotage du process difficile.

durée d'aération > de 20% à la durée normale d'aération

faible charge / capacité biologique

de manière globale la puissance d'aération est trop importante par rapport à l'activité biologique

faible activité biologique, ou peu de pollution à traiter

si [MES] > 4 gr/l, nitrification totale et très faible charge

si [MES] < 4 gr/l, si débit >= normal risque d'une légère accumulation d'ammonium, si débit-normal nitrification totale

Figure 1 – cas d'une sur-aération. Station OIEau

Cas d'une sur-charge

Le 27 avril (et les jours précédents) la station de l'OIEau est dans une situation de sur-charge. Le rapport entre la pollution à traiter et l'activité biologique fait que la durée d'aération maximale prévu par le paramétrage de l'algorithme INFLEX ne suffit plus à éliminer le NH₄. DISTEP analyse parfaitement bien cette situation : "élimination du NH₄ à nouveau incomplète" et donne un conseil adapté : "la durée d'aération journalière est insuffisante pour assurer une nitrification complète : je vous propose d'augmenter cette durée en diminuant le critère durée_coupure_air_max".

Ce conseil a été mis en application le 29 avril à 12h très exactement (voir figure 2 ci-dessous). Le 01 mai, l'élimination NH₄ est à nouveau totale et DISTEP le détecte bien : "nitrification totale après une faible accumulation au pic de charge". A noter la réactivité du process !

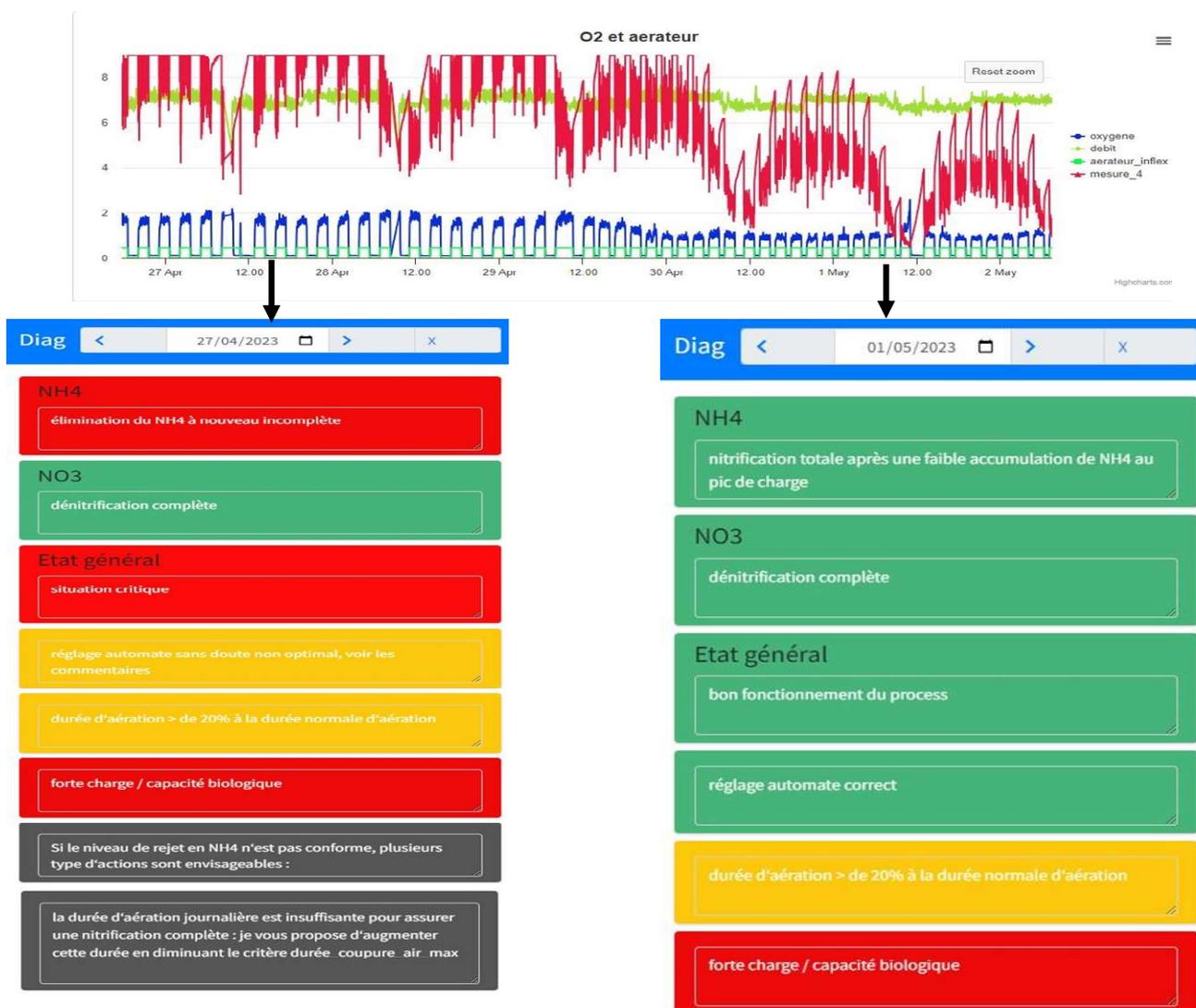


Figure 2 – cas d'une sur-charge. Station OIEau

Annexe 2 : Bilans 24h sur les 5 sites étudiés

Station de PAMIERS

Date	[N-NH4]e (mg N/l)	[N-NH4]s (mg N/l)	[N-NO3]e (mg N/l)	[N-NO3]s (mg N/l)	[NTK]e (mg N/l)	[NTK]s (mg N/l)	[DCO]e	[DCO]s	DCO / N
20/01/2022	42.7	0.08	0.23	1.65	64.4	0.5	1419	14	33.2
10/02/2022	49.0	1	0.23	0.58	72	3.7	948	8	19.3
15/03/2022	60.7	0.58	0.23	0.43	86.7	2.4	1044	42	17.2
15/04/2022	48.3	0.27	0.2	0.23	66.8	1.7	719	30	14.9
15/05/2022	48.0	1	0.33	0.43	56.3	2.8	1108	32	23.1
15/06/2022	36.0	0.24	0.23	0.23	59.6	3.6	984	30	27.3
10/07/2022	67.8	0.18	0.23	0.33	103	1.5	967	30	14.3
15/08/2022	50.6	0.2	0.23	0.13	73.4	1.8	816	30	16.1
15/09/2022	47.2	0.22	0.23	0.57	70.5	2.8	800	30	17.0
15/10/2022	60.4	0.19	0.23	0.41	79.6	1.6	807	30	13.4
20/11/2022	39.0	0.12	0.23	0.45	60.8	1.7	1347	30	34.5
15/12/2022	50.2	0.27	0.23	0.67	65	1.6	970	30	19.3
20/01/2023	55.0	0.22	0.23	0.46	56	2.1	945	38	17.2
10/02/2023	84.0	0.26	0.23	0.75	140	2.7	1458	32	17.4
15/03/2023	63.0	0.46	0.23	0.38	82	2.2	957	43	15.2
15/04/2023	56.0	0.47	0.23	0.26	76.6	2	780	36	13.9
15/05/2023	47.5	0.48	0.23	0.23	72	0.48	746	33	15.7
15/06/2023	42.5	0.63	0.23	0.23	70	2.7	941	34	22.1
10/07/2023	50.0	0.43	0.23	0.23	80	1.6	814	30	16.3
15/08/2023	54.0	0.58	0.23	0.23	76	1.8	940	29	17.4
15/09/2023	53.0	0.3	0.23	0.23	80	2.5	886	38	16.7
Moyenne	52.6	0.4	0.2	0.4	75.7	2.1	971.2	30.9	19.1

Tableau 1 - bilans "officiels" effectués sur la station de PAMIERS

*A noter sur cette station, la présence d'un abattoir.

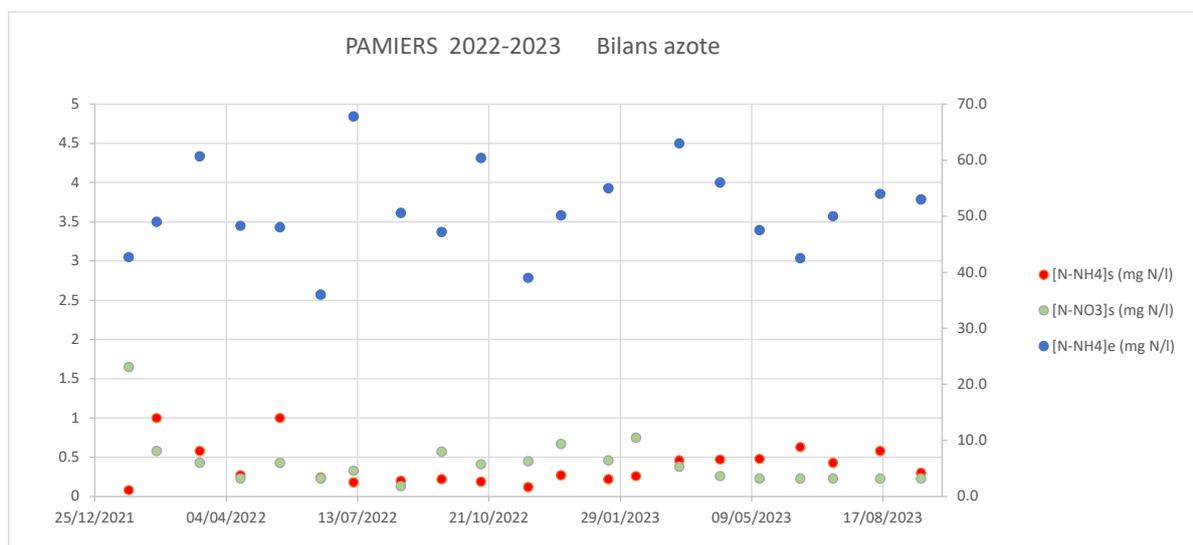


Figure 1 - représentation graphique des bilans azote "officiels" effectués sur la station de PAMIERS
Station de LANGON

Date	[N-NH4]e (mg N/l)	[N-NH4]s (mg N/l)	[N-NO3]e (mg N/l)	[N-NO3]s (mg N/l)	[NTK]e (mg N/l)	[NTK]s (mg N/l)	[DCO]e	[DCO]s	DCO / N
07/02/2022	74	0.5	0.1	0.5	99	2	887	42	12.0
11/03/2022	75	0.5	0.1	2.7	100	5.5	930	49	12.4
03/05/2022	77	0.9	0.1	1.42	95	2.7	926	42	12.0
19/09/2022	74	0.9	0.1	0.63	95	0.5	930	34	12.6
04/10/2022	75	2.66	0.1	0.63	98	3.4			
29/11/2022	61	0.5	0.1	3.6	91	1.5	871	25	14.3
03/02/2023	80	0.5	0.1	13	100	2.1	913	38	11.4
10/03/2023	74	2.5	0.1	2.1	98	3.8	906	33	12.2
24/03/2023	75	0.32	0.1	1.9	100	0.8	900	16	12.0
06/04/2023	78	2.4	0.1	0.1	110	3.7	1190	38	15.3
02/05/2023	79	4.5	0.1	0.1	110	6.6	1124	43	14.2
26/07/2023	65	0.9	0.1	0.45	89	2.1	743	37	11.4
17/08/2023	77	1	0.1	0.86	110	2	992	25	12.9
18/09/2023	54	1.7	0.1	0.63	73	3.7	661	38	12.2
04/10/2023	35	0.9	0.1	3.1	220	2.1	746	42	21.3
Moyenne	70.2	1.4	0.1	2.1	105.9	2.8	908.5	35.9	13.3

Tableau 2 - bilans "officiels" effectués sur la station de LANGON

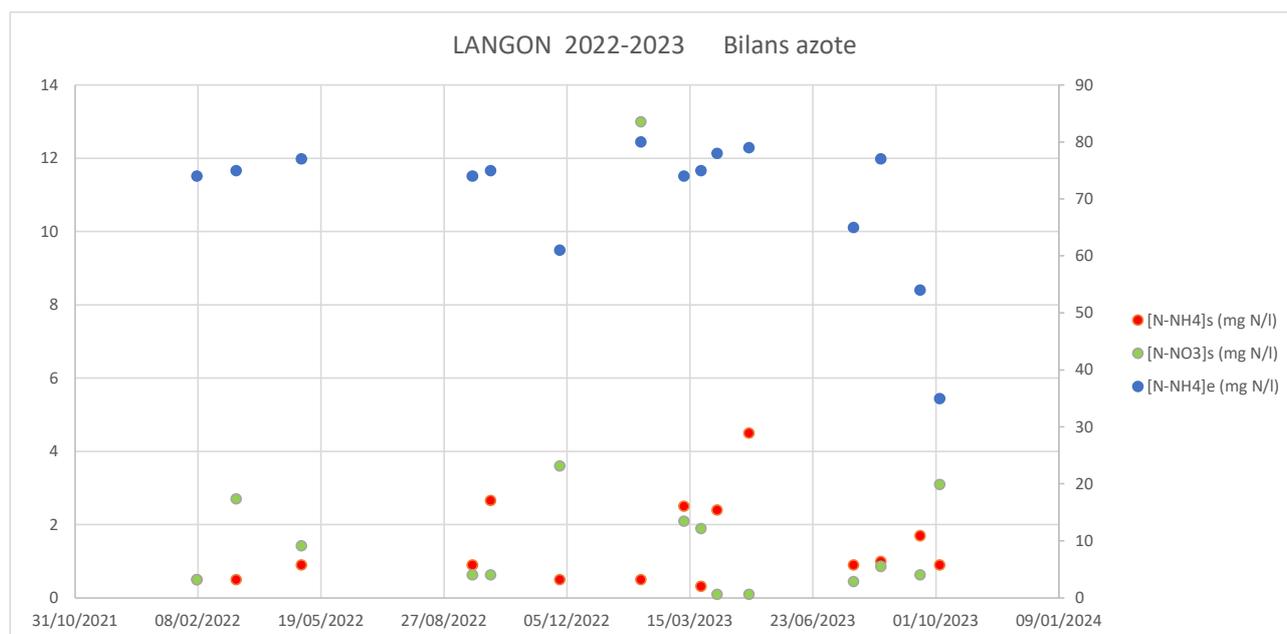


Figure 1 - représentation graphique des bilans azote "officiels" effectués sur la station de LANGON

Station de SAINT PAUL sur SAVE

Date	[N-NH4]e (mg N/l)	[N-NH4]s (mg N/l)	[N-NO3]e (mg N/l)	[N-NO3]s (mg N/l)	[NTK]e (mg N/l)	[NTK]s (mg N/l)	[DCO]e	[DCO]s	DCO / N
15/04/2022	46	0.7	0	0.5	73	0.5	820	20	17.8
06/07/2022	59	0.4	0	0.9	85	0.4	870	23	14.7
13/10/2022	89	1.1	0	0.7	100	0.3	1200	19	13.5
17/01/2023	36	1	0	0	53	0.8	740	22	20.6
14/04/2023	53	0.4	0	0.7	67	0.5	620	24	11.7
04/07/2023	57	1.3	0	0.5	85	0.6	660	17	11.6
Moyenne	56.7	0.8	0.0	0.6	77.2	0.5	818.3	20.8	15.0

Tableau 3 - bilans "officiels" effectués sur la station de SAINT PAUL sur SAVE

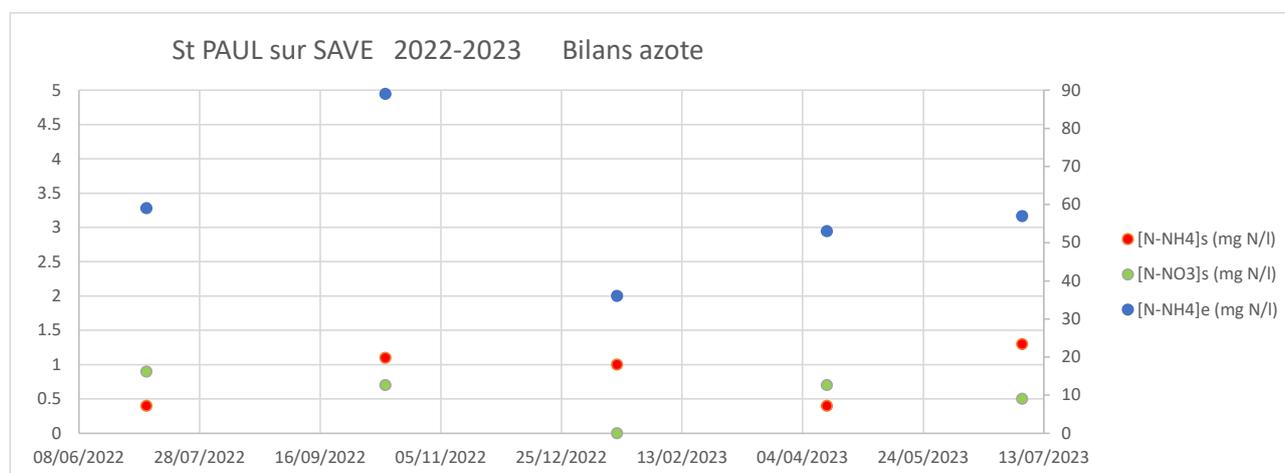


Figure 3 - représentation graphique des bilans azote "officiels" effectués sur la station de SAINT PAUL sur SAVE

Station de SAINT LARY SOULAN

Date	[N-NH4]e (mg N/l)	[N-NH4]s (mg N/l)	[N-NO3]e (mg N/l)	[N-NO3]s (mg N/l)	[NTK]e (mg N/l)	[NTK]s (mg N/l)	[DCO]e	[DCO]s	DCO / N
15/01/2022	67	0.5	0.5	1.7	78	2.4	463	32	6.9
15/02/2022	98	6.6	0.5	7.3	121	15	1130	39	11.5
15/03/2022	61	0.59	0.5	5.8	77	21	590	31	9.7
15/04/2022	18	5.3	0.57	1.4	26	7	177	31	9.8
15/05/2022	37	0.4	0.1	0.5	49	1.5	400	28	10.8
15/06/2022	28	1	0.5	0.5	42	2	350	28	12.5
15/07/2022	65	1.8	0.5	1.7	84	3.5	645	21	9.9
15/08/2022	73	1.3	0.5	2.5	97	3	862	30	11.8
15/09/2022	38	0.9	0.5	0.5	56	2.6	505	32	13.3
15/10/2022	23	0.5	0.5	0.5	41	2	443	26	19.3
20/11/2022	24	0.5	1.3	1.8	31	1.3	217	19	9.0
15/12/2022	70	2.3	0.5	12	87	3	578	17	8.3
20/01/2023	52	1.2	0.5	1.8	64	3.6	473	27	9.1
10/02/2023	91	12	0.5	10	120	14	840	35	9.2
15/03/2023	72	5.7	0.5	3.3	93	9.1	623	48	8.7
15/04/2023	46	0.8	0.5	0.8	57	2	314	24	6.8
15/05/2023	37	0.56	0.5	0.6	47	1.5	318	17	8.6
15/06/2023	36	3	0.5	0.5	50	4.5	327	22	9.1
10/07/2023	65	1.1	0.5	2.9	82	2.9	661	28	10.2
Moyenne	52.7	2.4	0.5	3.0	68.5	5.4	521.9	28.2	10.2

Tableau 4 - bilans "officiels" effectués sur la station de SAINT LARY SOULAN

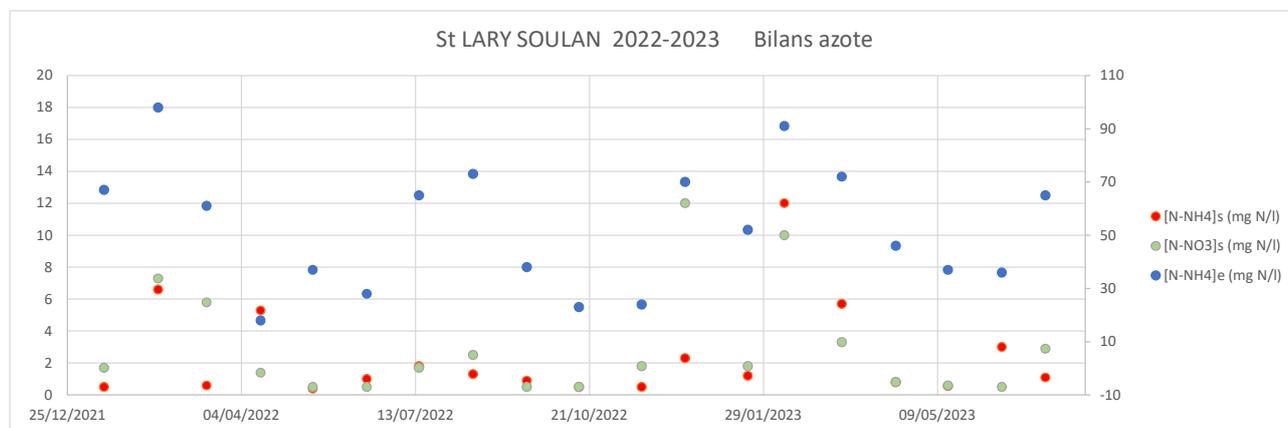


Figure 4 - représentation graphique des bilans azote "officiels" effectués sur la station de

SAINT LARY SOULAN

Station de VILLEFRANCHE de LAURAGAIS

Date	[N-NH4]e (mg N/l)	[N-NH4]s (mg N/l)	[N-NO3]e (mg N/l)	[N-NO3]s (mg N/l)	[NTK]e (mg N/l)	[NTK]s (mg N/l)	[DCO]e	[DCO]s	DCO / N
15/03/2022	31	0.4	0	1.3	42	201	240	24	7.7
10/05/2022	38	0.4	0	0.5	51	1.9	310	23.4	8.2
05/07/2022	53	0.6	0	0.6	74	2.2	730	46.7	13.8
13/09/2022	97	0.4	0	0.5	140	0.9	840	15.7	8.7
14/03/2023	35	0.5	0	0.5	51	2.1	560	24	16.0
09/05/2023	38	0.4	0	0.6	53	2.1	700	23	18.4
18/07/2023	57	0.4	0	0.5	76	0.8	690	17	12.1
12/09/2023	56	0.4	0	0.6	79	1.1	910	22	16.3
Moyenne	50.6	0.4	0.0	0.6	70.8	26.5	622.5	24.5	12.6

Tableau 5 - bilans "officiels" effectués sur la station de VILLEFRANCHE de LAURAGAIS

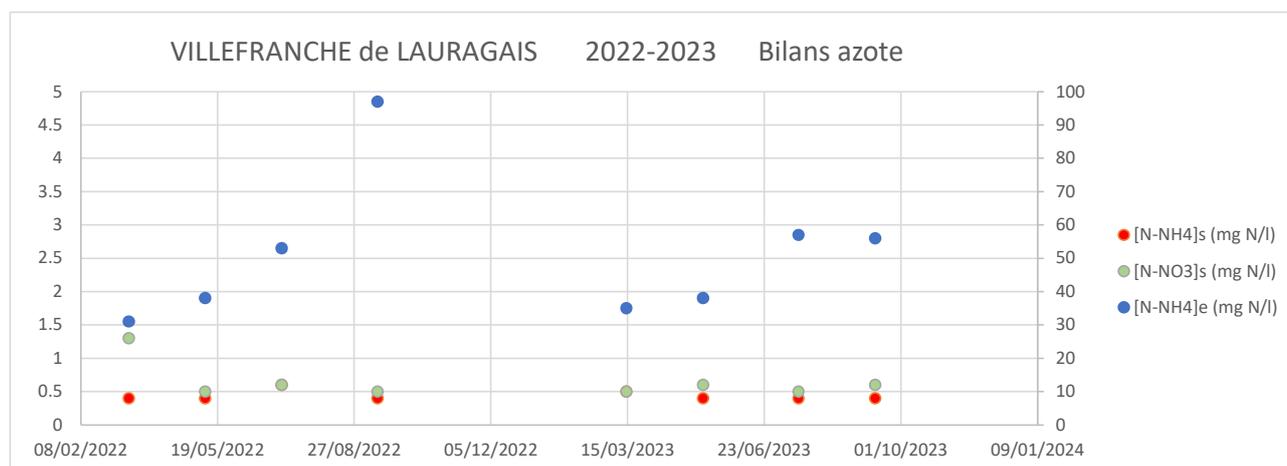


Figure 5 - représentation graphique des bilans azote "officiels" effectués sur la station de VILLEFRANCHE de LAURAGAIS