

DADY : Démonstrateur d'Automatique et de Dynamique

Pascal Dufour¹, Boussad Hamroun¹, Isabelle Pitault¹, Jean Pierre Valour

¹Univ Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, Laboratoire de Génie des Procédés et de Génie Pharmaceutique (LAGEPP UMR 5007), 43 boulevard du 11 novembre 1918, F-69100, VILLEURBANNE, France

pascal.dufour@univ lyon1.fr, boussad.hamroun@univ lyon1.fr, isabelle.pitault@univ lyon1.fr, jean-pierre.valour@univ lyon1.fr

Resumé

Le Laboratoire d'Automatique, de Génie des Procédés et de Génie Pharmaceutique (LAGEPP) est depuis 1988 un laboratoire de recherche universitaire français (UMR CNRS 5007-Université Claude Bernard Lyon 1). Il a lancé en 2019 un projet interne pluriannuel de conception d'un système expérimental : le Démonstrateur d'Automatique et de DYnamique. Il a pour objectif, dans un aspect pluridisciplinaire, de permettre de valider expérimentalement divers travaux de recherche du LAGEPP. Ceux-ci couvrent des thématiques de l'Automatique théorique et/ou appliquée au Génie des Procédés et/ou en modélisation en Génie des Procédés et Énergétique. Ces validations expérimentales doivent aider à mettre en valeur les travaux académiques du LAGEPP afin de toucher le milieu industriel, notamment pour l'automatique. On présente ici les premiers résultats d'avancement dans la conception du démonstrateur et la démarche de projet suivie.

Mots-clés: *démonstrateur, automatique, génie des procédés, commande avancée, PID, Matlab.*

1 Introduction

La recherche au LAGEPP y est abordée de façon monodisciplinaire, mais aussi très souvent multidisciplinaire dans les domaines suivant : l'automatique, le génie des procédés, le génie pharmaceutique et la physico-chimie. Le LAGEPP est composé d'environ 50 personnels permanents et de 50 personnels non permanents (essentiellement doctorants, mais aussi post-doctorants et stagiaires).

Le plus souvent, les gros équipements du LAGEPP sont dédiés à un des domaines de recherche. Jusqu'en 2019, il n'y en avait pas pour l'automatique. Le LAGEPP a donc lancé cette année là un projet interne pluriannuel afin de se doter d'un système expérimental appelé "Démonstrateur d'Automatique et de DYnamique" (DADY)¹. L'idée du DADY est de pouvoir répondre, dans un aspect pluridisciplinaire, à l'objectif suivant : permettre de valider expérimentalement divers travaux de recherche du LAGEPP, principalement dans des thématiques de l'Automatique (modélisation continue, identification, observation/capteur logiciel, commande) appliquée au Génie des Procédés et/ou aussi de valider des travaux de modélisation en Génie des Procédés et Énergétique. Ces validations expérimentales doivent au final aider à mettre en valeur les travaux académiques du LAGEPP afin de toucher le milieu industriel, et de favoriser les projets de recherche, notamment entre automaticiens et industriels. En effet, comparé aux autres domaines de recherche du

¹[lagepp.univ-lyon1.fr/materiel/dady-demonstrateur-pour-la-recherche-en-automatique-appliquee-au-genie-des-procedures/](http://lagepp.univ-lyon1.fr/materiel/dady-demonstrateur-pour-la-recherche-en-automatique-appliquee-au-genie-des-procedes/)

LAGEPP, il y a historiquement moins d'interactions entre automaticiens et industriels (même si 3 thèses CIFRE ont été soutenues en automatique ces 10 dernières années). Le DADY pourra aussi être utilisé comme application dans le cadre des thèses de doctorat.

Pour répondre à cela, on cherche à développer pour le DADY une architecture matérielle et numérique la plus similaire à celle que l'on peut trouver dans l'industrie : des composants du procédé à son architecture physique, à l'instrumentation, aux automatismes, aux logiciels de communication, de commande et de supervision. Pour faire un lien rapide avec les activités de recherche en automatique, l'interface logicielle doit se faire avec l'outil numérique habituel dans ce domaine au LAGEPP : Matlab.

Le document est organisé comme suit : les objectifs liés aux besoins du démonstrateur sont donnés. Puis les architectures choisies de procédé et des automatismes sont discutées. Enfin la gestion du projet et son état d'avancement depuis sa création en 2019 sont détaillés.

2 Objectifs du démonstrateur

Le DADY a été pensé pour être développé et être évolutif avec plusieurs phases de développement pour la partie procédé (matériel) :

- Hydraulique : 4 réservoirs d'eau (actuellement en cours), appelés réacteurs (au vue de la perspective finale)
- Aspect thermique (un cryostat vient d'être ajouté)
- Réseau d'échangeurs thermiques (en perspective à ce jour)
- Réacteurs chimiques (en perspective à ce jour)

Un point important pour l'automatique, et qui est souvent négligé industriellement en génie des procédés, est que toute évolution matérielle sur le procédé peut avoir un impact sur son automation :

- d'un point du vue matériels : ajout d'entrées (capteurs) / sorties (actionneurs) sur l'automate, voire rajout de modules automate;
- d'un point du vue logiciels : modification des applications de communication, de commande et de supervision ;
- d'un point du vue théorie de la commande : on touche là à l'aspect principal qui nous intéresse. En effet, des modifications qui semblent légères a priori d'un point de vue procédé peuvent largement impacter la structure du modèle sous-jacent, et donc son contrôle : par exemple, dans une régulation du niveau de remplissage d'eau dans un réservoir, passer d'un réservoir cylindrique à un réservoir sphérique fait passer du monde des systèmes linéaires au monde des systèmes non linéaires. Ainsi, le régulateur PID qui fonctionnait très bien sur une consigne quelconque dans le premier cas, de donnera plus les mêmes performances dans le second cas. D'autres modifications peuvent de même impacter les couplages entre phénomènes, rajouter des aspects multivariables (alors que le PID est monovariable par nature), voire rajouter des aspects spatiaux (en plus d'être déjà dynamiques) avec des phénomènes non uniformes dans l'espace (en passant par exemple d'un volume de 1 L à 1000 L). Ce sont ces aspects que nous voulons aussi mettre en évidence via le DADY, en montrant que les méthodes (algorithmes) développées au LAGEPP permettent, en théorie mais aussi donc en pratique, dans ces conditions, d'améliorer les performances de systèmes ainsi pilotés.

Au final, les algorithmes développés au LAGEPP doivent permettre de mener diverses études :

- Étudier la robustesse des lois de commande par rapport aux incertitudes considérées (structure du modèle, paramètres du modèle (certains avec une valeur peu ou mal connue, ou variant dans le temps)
- Évaluer les marges de stabilité des lois de commande en boucle fermée
- Évaluer les gains de performance par rapport aux commandes classiques (PID notamment).

Le DADY doit donc permettre de montrer une voie pour l'intensification des procédés via des outils de l'automatique avancée [1] développés au LAGEPP.

3 Architecture pour le procédé

Après plusieurs discussions et évolutions depuis 2019, l'architecture de base a actuellement convergé vers celle donnée en figure 1 avec 4 réacteurs (sur 2 lignes (haut et bas) et 2 colonnes (gauche et droite)). Ils sont de forme différente (pour montrer par exemple les effets des non linéarités dues aux géométries et les limitations d'un PID face à de meilleurs algorithmes) : 2 cylindriques en bas (un cylindre couché à gauche, un cylindre droit à droite), et en haut un nouveau cylindre droit et une sphère. Les 2 cylindres droits sont de section différente.

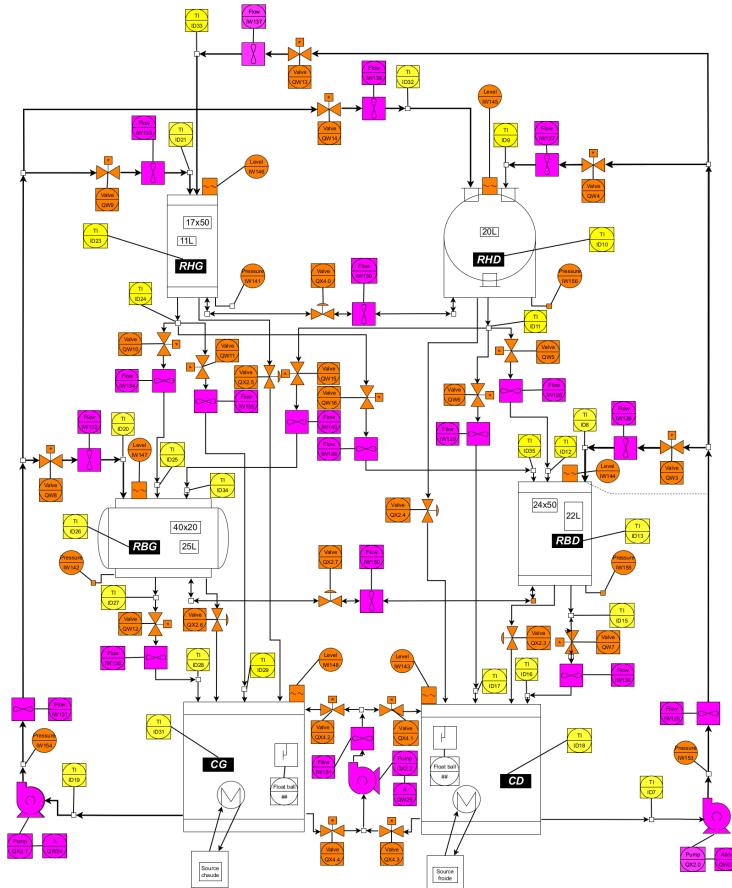


Figure 1: Synoptique du DADY, en mode purement hydraulique (version au 14 décembre 2021)

Coté actionneurs, nous avons : 3 pompes (fluide chaud, fluide froid et pour faire le lien entre les deux cuves de réserve (en eau chaude et eau froide) du bas), 10 vannes tout ou rien (TOR, en orange) permettent de vidanger chacun des réacteurs ou de connecter 2 réacteurs positionnés sur le même niveau et 14 vannes proportionnelles (en orange). Tout ceci permet de choisir plusieurs types d'architectures et les débits d'alimentation (chaud, froid) de chaque réacteur et les débits entre eux. Ainsi, on peut avoir 1, 2, 3 ou 4 réacteurs utilisés ou non, couplés ou non. Du coté capteurs, il y a : 19 débitmètres (en rose), 6 capteurs de pression et 6 capteurs à ultrasons pour les mesures de niveau, 27 thermocouples (en jaune) pour les mesures en divers points (par exemple en amont, dans et en aval d'un réacteur).

4 Architecture pour l'automatisme

L'architecture numérique globale (acquisition, traitement, commande et supervision) choisie est construite sur la base de dispositifs matériels et logiciels similaires à ce que l'on peut trouver dans l'industrie. L'objectif est d'avoir une maquette la plus automatisée possible (pour la configuration de l'architecture, la commande et la sécurité). Pour cela, on utilise :

- un automate industriel ADAM qui gère les entrées/sorties analogiques et TOR et qui est relié par câbles à toutes les entrées/sorties physiques. Il est programmé via le logiciel dédié CODESYS. CODESYS ne gère que les entrées/sorties et les étalonnages : aucune loi de commande n'y sera écrite. Le choix de la marque ADAM, qui ne serait être unique comme solution, s'est fait sur la base de la bibliographie (articles montrant les capacités d'un automate à travailler avec Matlab), d'un matériel similaire existant en enseignement et du moindre coût face à des marques automates plus classiques.
- une interface de communication de type OPC via le logiciel industriel MATRIKON, afin d'établir la communication entre les divers logiciels et l'automate. Là aussi, le choix de la marque, qui ne serait être unique comme solution, s'est fait sur la base d'une comparaison entre 2 logiciels utilisés en enseignement et du coût.
- une supervision industrielle développée via le logiciel industriel PCVue dédié, basée sur un échange bidirectionnel de données avec l'automate via l'OPC. Là aussi, le choix de la marque, qui ne serait être unique comme solution, s'est fait sur la base d'une expérience concluante depuis plusieurs années en enseignement et sur les très bonnes relations avec l'agence Arc Informatique qui nous accompagne déjà en support depuis plusieurs années en enseignement.
- via l'OPC et l'échange bidirectionnel de données, une interface existe dans Matlab pour intégrer toutes les lois de commande et de sécurité, et pour faire l'interface avec les futurs algorithmes développés par ailleurs par le LAGEPP. En effet, Matlab est l'outil numérique classique des automaticiens au LAGEPP.

5 Approche projet

5.1 Moyens humains

Le DADY repose tout d'abord sur la dynamique d'un groupe de travail de 4 personnels permanents du LAGEPP : deux enseignant-chercheurs en automatique, une chargée de recherche en génie des procédés et un ingénieur d'études. Bien entendu, ces personnels ne sont pas à temps plein sur cette mission. Parallèlement, des étudiants de notre Master EEEA participent activement aux

développements du DADY via des projets de M2 (3 mois à temps plein pour 2 ou 4 binômes à l'hiver), et 5 à 6 mois à temps plein pour le stage de fin d'étude de Master 2.

5.2 Moyens financiers

Le financement se fait sur fonds propres du LAGEPP, en mode pluri-annuel. Pour cela, le budget annuel nécessaire pour développer le DADY est demandé dans un appel à projets interne en mai de chaque année. Le niveau de financement des divers projets soumis est arbitré par le conseil de laboratoire. Depuis 2019, des crédits ont donc pu être utilisés pour démarrer l'installation.

5.3 Gestion de projet

Avec 4 personnes permanents et des étudiants qui travaillent sur le DADY pour quelques mois, la "mémoire" du projet et la gestion des documents numériques (applications, rapports, ...) sont très importantes. Au delà des fréquentes réunions, divers outils numériques sont utilisés : Claroline, qui est le serveur pédagogique de Lyon 1, permet d'y stocker les fichiers importants (les travaux finaux des étudiants), les documentations et surtout l'historique des comptes rendus (un forum par groupe d'étudiants). Ainsi, au démarrage, un nouvel étudiant a beaucoup d'éléments d'entrée. Chaque réunion (2 par mois environ) fait l'objet d'un compte rendu et chaque étudiant y fait son bilan 2 fois par semaine, ce qui permet de poser les questions en distanciel (il est rappelé que l'essentiel des développements a néanmoins pu avoir lieu pendant les phases de confinement nationales depuis 2020). Quant à l'outil en ligne diagrams.net, il permet d'échanger sur le design des divers schémas nécessaires.

6 État d'avancement

6.1 2019/2020

Le démarrage a concerné tout d'abord un cycle de réunions dans le groupe de travail du DADY pour définir les besoins : avoir diverses architectures procédés adaptables, réaliser les calculs pour les dimensionnements pour arriver aux choix et achat des premiers matériels. Pour l'aspect automatisation, cela a touché au choix et achat de matériels informatiques (PC, automate), et au choix et achat des logiciels concernant les parties logicielles (automate, communication, supervision, commande). Le montage a ainsi pu commencer.

6.2 Hiver 2020/2021

L'accueil d'un premier groupe de 4 étudiants de Master 2 EEEA en mode projet a eu lieu. Leur objectif était de valider le début de l'automatisation : faire les premiers montage et câblage de l'automate, et design des applications automate, de communication OPC, de supervision et première commande par Matlab. Ceci pour le réacteur en bas à droite, avec une seule architecture matérielle. Il y avait de l'ordre de 10 entrées/sorties. L'IHM était certes basique mais opérationnelle. Une loi de commande basique (PID) a été validée pour la régulation de niveau, de même qu'une gestion de sécurité basique (anti-débordement).

6.3 Printemps été 2021

Un premier stagiaire de Master 2 EEA a été accueilli. Ceci a permis de passer à deux réacteurs (colonne de droite), d'avoir de multiples architectures matérielles, de passer à environ 20 entrées/sorties. Une supervision complète des 4 réacteurs a été développée. La gestion de la sécurité est devenue

plus réaliste. Plusieurs lois de commande mono/multi variables ont été intégrées et un simulateur dynamique sous matlab-simulink a commencé à être développé : il comprend 4 réacteurs, diverses configurations d'architecture, de commande et de sécurité possibles (cf figure 2). Une réflexion a été menée pour l'extension de l'automate (architecture procédé, réseaux d'échangeurs thermiques) pour définir la poursuite d'achat de modules automate.

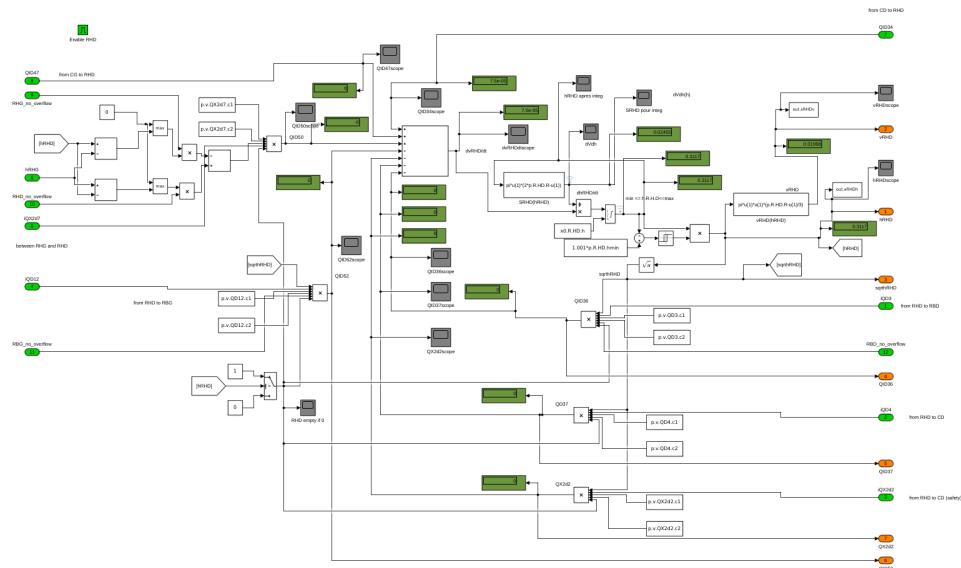


Figure 2: Modèle Simulink du DADY : zoom sur le réacteur en haut à droite (au 06 juillet 2021)

6.4 Hiver 2021/2022

Un nouveau binôme d'étudiants de Master 2 EEEA en mode projet a été accueilli. Ceci a permis de passer à 3 réacteurs, et d'ajouter les deux cuves (réserves générales d'eau chaude (gauche) et froide (à droite)). Un cryostat, sa commande via modbus par Matlab et une cuve d'eau chaude ont été ajoutés. Suite à la réflexion de l'été, l'unique armoire automate et puissance a été scindée pour avoir deux nouvelles armoires (une basse puissance pour l'automate (figure 3), une pour la puissance (figure 4)). Les applications de communication, automate et supervision ont été mises à jour selon le nouveau schéma de montage.

6.5 A ce jour : printemps été 2022

Actuellement, un second stagiaire de Master 2 EEA est accueilli. Son travail se focalise plus sur les aspects de contrôle de température du cryostat, dans la cuve d'eau chaude, et des niveaux. Des lois de commande de type gain-scheduling sont en cours de tests. D'autres problèmes de régulation mono et multi-variables vont pouvoir commencer à être étudiés. Dernièrement, le quatrième réacteur a été monté comme on le voit en figure 5.

7 Conclusion

Entre 2019 et aujourd’hui, le projet DADY est passé d’une idée à de premières validations expérimentales. Il permet de toucher à des aspects en génie des procédés, en automatique théorique, et entre les deux à l’automatisation dans une vision industrielle. Suite aux discussions, il a subit des évolutions

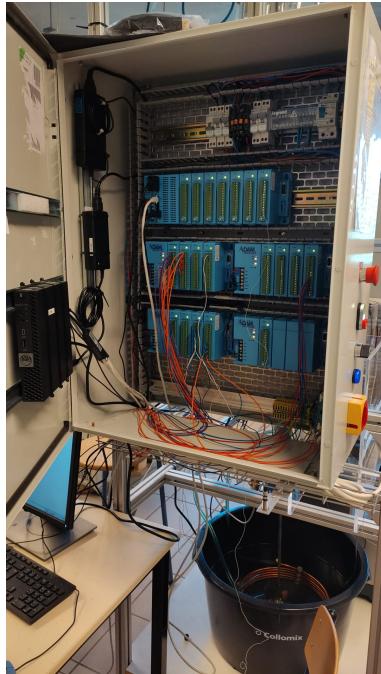


Figure 3: Armoire des automatismes du DADY (au 04 mai 2022)

pour passer actuellement à un procédé à 4 réacteurs (avec de l'eau) avec l'intégration en cours de l'aspect thermique. Le projet avance malgré des obstacles, tels les confinements successifs ou des problèmes avec quelques fournisseurs. Coté humain, une vraie dynamique de projet autour d'un procédé automatisé pluri-disciplinaire au LAGEPP a été mise en route.

La poursuite dans l'année à venir concerne le montage pour avoir toutes les architectures possibles sur les 4 réacteurs (les caractéristiques physiques des électrovannes proportionnelles ne correspondant pas à celles attendues, les électrovannes ont dû être renvoyées pour requalification et sont actuellement en attente de retour SAV depuis quelques mois). Aussi la validation du modèle numérique reste à finir, qui permettra de valider totalement en simulation dans une approche "logiciel dans la boucle" les applications d'automatisme (automate, communication, supervision). Ceci permet ainsi d'envisager très rapidement divers cas d'étude (en modifiant les valeurs initiales de hauteur d'eau (les états du modèle) par exemple). Des aspects de commande avancée pourront être traités. L'intégration simple et rapide par un utilisateur lambda du LAGEPP pour y tester ses algorithmes doit être réfléchie, tant pour le modèle de simulation que pour le système réel automatisé. La communication vers les industriels doit aussi commencer à être réfléchie, afin de se rapprocher de l'objectif initial du DADY qui est de valoriser vers les industriels les travaux de recherche en automatique du LAGEPP.

8 Remerciements

Le groupe de travail du DADY tient à remercier les étudiants ayant participé au développement de ce démonstrateur jusqu'ici : Salim Ramdani, Kevin-Jonas-Duval Kamte Sika, Soulaiman Bennaji, Yasser Chekor, Sami Ikhadalle, Léo Casabella, Asma Bourouina, Alexandre Monget.

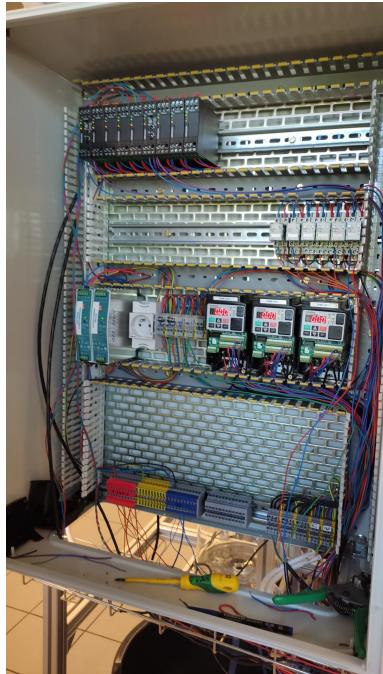


Figure 4: Armoire de la partie puissance du DADY (au 04 mai 2022)

References

- [1] Francoise Lamnabhi-Lagarrigue and Anuradha Annaswamy and Sebastian Engell and Alf Isaksson and Pramod Khargonekar and Richard M. Murray and Henk Nijmeijer and Tariq Samad and Dawn Tilbury and Paul Van den Hof *"Systems and control for the future of humanity, research agenda: Current and future roles, impact and grand challenges"*. Annual Reviews in Control, 43, 1–64, 2017

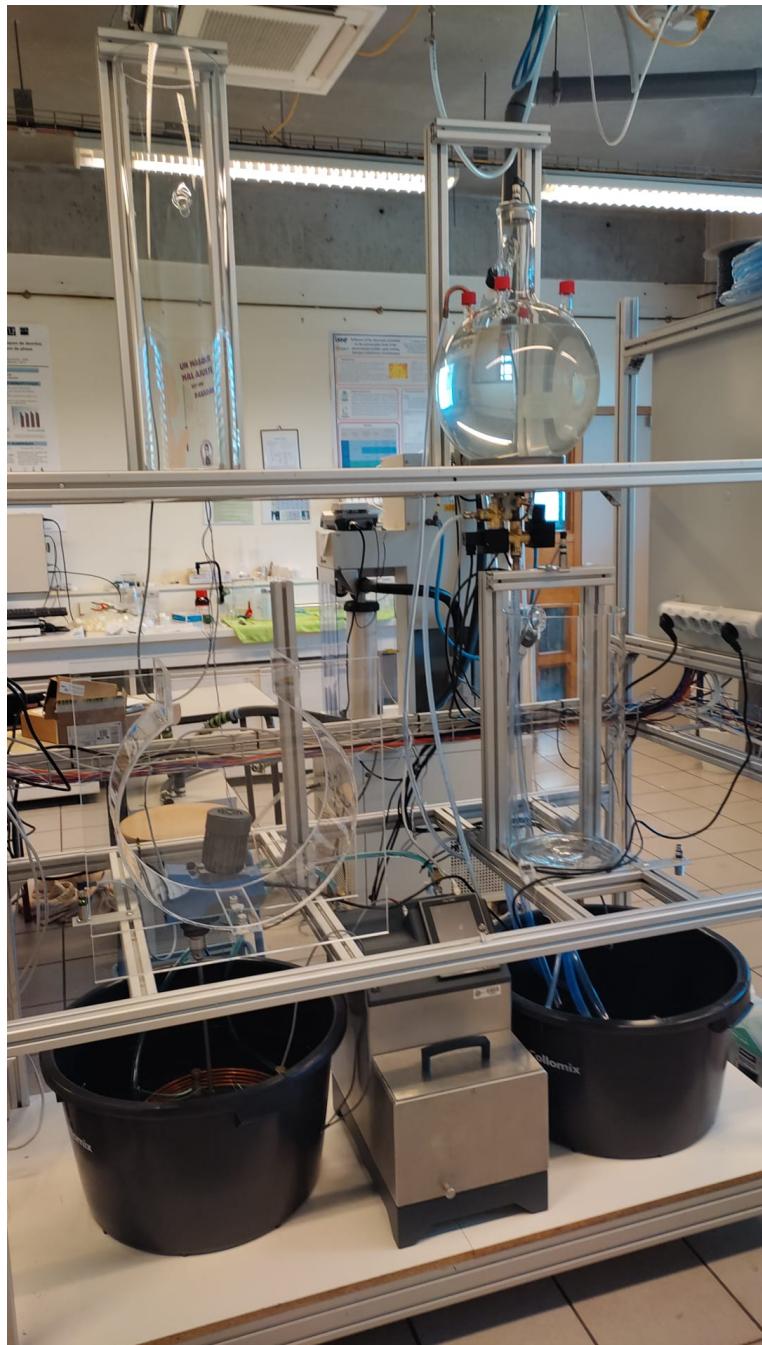


Figure 5: Partie procédé du DADY (au 04 mai 2022)