

Librairie de génie électrique et d'électronique de puissance

pour les travaux pratiques en licence EEEA

Olivier Fruchier, Thierry Talbert, Frederik Thiery

thierry.talbert@promes.cnrs.fr*, olivier.fruchier@promes.cnrs.fr, thiery@univ-perp.fr

Laboratoire PROMES-CNRS, UPR8521, Université de Perpignan Via Domitia, 66100 Perpignan

RÉSUMÉ : La période COVID19 a été l'occasion de reprendre l'ensemble de nos enseignements, pour leur apporter une nouvelle dimension. Les travaux présentés dans cet article se situent dans la continuité de la « *rénovation* » de la licence EEEA de l'université de Perpignan Via Domitia. Après une première phase présentée lors du précédent CETSIS orientée transversalité, cet article présente un ensemble d'outils de simulation en électronique de puissance développés spécifiquement pour les salles de TP en licence 2^{ème} et 3^{ème} année de licence EEEA. Les différents composants utilisés en TP ont été modélisés, intégrés dans un ensemble de librairies et mis à disposition de tous élèves. L'objectif est ici de développer l'esprit critique de nos étudiants par la confrontation de résultats théoriques, pratiques et de simulations, le tout dans un format d'échange entre les étudiants et l'enseignant, et entre les étudiants.

Mots clés : génie électrique ; électronique de puissance ; PLECS ; librairie

1 INTRODUCTION

Dans notre précédent article « *Mise en place d'un enseignement transversal* » CETSIS 2021 [1], nous avons présenté la modification de la maquette de la licence SPI parcours EEEA. Cette nouvelle maquette a mis en place la « *fusion* » de certains enseignements. Pour rappel, 4 matières du parcours EEEA de la licence SPI ont été « *regroupées* » pédagogiquement :

- Matière 1 : Commande des systèmes linéaires continus
- Matière 2 : Chaîne de conversion électrique
- Matière 3 : Analyse et commande des systèmes échantillonnés
- Matière 4 : Traitement de l'énergie électrique

Les compétences que les étudiants doivent avoir assimilées à l'issue de ces matières sont les suivantes :

- Être capable d'analyser un système
- Savoir choisir la structure de conversion de l'énergie électrique
- Dimensionner et choisir les éléments constitutifs de la structure
- Être capable de formuler mathématiquement les problèmes
- Savoir synthétiser des correcteurs, continus dans le premier cas, discrets dans le second
- Savoir contrôler les échanges d'énergie entre les sources et les charges

Notre objectif a été de proposer une nouvelle structure d'enseignement au travers d'un ou plusieurs problème(s)/projet(s) commun(s) aux deux disciplines et se déroulant sur l'année. Le projet est transversal et permet aux étudiants d'identifier dans les différentes parties du projet les contenus des matières en suivant un fil rouge pédagogique. L'approche des enseignements par projet permet de palier la différence de niveau des étudiants en les associant par leur formation d'origine, et non plus par affinités. La scénarisation des enseignements [2] est donc une étape importante dans l'élaboration de cette approche. La nouvelle structure a été, pour une partie de l'équipe pédagogique, une prise de conscience de la nécessité de revoir l'ensemble de

leurs méthodes pédagogiques [3]. La période COVID19 que nous avons traversé, nous a amené à compléter nos enseignements par des TD d'autoformation sous Moodle. Un questionnaire d'auto-évaluation a été réalisé pour suivre l'évolution de l'apprentissage des étudiants.

Nos travaux de transversalité [4,5] ont porté uniquement sur les CM et TD, une seconde partie de notre travail a donc été la remise à plat de l'ensemble des travaux pratiques de la licence. La première remarque a été que les TP n'étaient plus adaptés aux CM et TD mis en place, en parallèle, nous retrouvons les problèmes suivants :

- le manque de préparation des TPs ;
- le manque de participation des étudiants ;
- leur passivité face au TP ;
- le manque de recul vis-à-vis des expérimentations, des calculs et des valeurs trouvées.

Pour tenter de résoudre tout ou partie de ces problèmes, les TP ont été réorganisés afin d'amener une partie de travail individuel des binômes pendant les séances de TP en incluant obligatoirement une partie simulation pour chaque sujet.

Dans une première partie, nous présenterons les librairies PLECS développées pour nos étudiants. Dans une seconde partie, nous présenterons la nouvelle organisation des TP avec trois exemples de TP, ainsi que les retours de nos étudiants. Nous terminerons cet article avec les futurs développements qui sont en cours de réalisation.

2 PRÉSENTATION DE LA LIBRAIRIE SPI

Notre premier travail a été de fournir à nos étudiants un ensemble de modèles des différents éléments (composants passifs, actifs, boîtiers) qui sont utilisés en salle de TP, la première version de nos librairies a contenu les éléments suivants :

- Sources AC : Alternostat Langlois, sources monophasées et triphasées des paillasses de TP ;

- Sources DC : sources DC symétriques Langlois ;
- Charges RLC monophasées, rhéostats, inductances variables, boîtiers de condensateurs ;
- Transformateurs didactiques et industriels ;
- Éléments de mesures comme le W, VA et VAR meters ;
- Circuit magnétique.

L'ensemble des bibliothèques a été développé pour l'outil de simulation en électronique de puissance PLECS. Cet outil est en accès libre dans toutes nos salles de TP, ainsi que sur l'ordinateur personnel des étudiants par l'utilisation d'une licence personnelle de l'université pour 1 an. Toutes les bibliothèques ont été regroupées dans un cours spécifique (Fig. 1) accessible sur la plateforme pédagogique Moodle dont l'espace comprend les sections suivantes :

- L'installation de PLECS sur leur ordinateur personnel ;
- L'utilisation de PLECS pour les débutants ;
- Le mode avancé ;
- Les bibliothèques SPI.

En parallèle, nous avons réalisé et mis en ligne des vidéos de configuration, d'utilisation en mode simple et avancé de PLECS sur YouTube :

<https://www.youtube.com/playlist?list=PLiM8ZzVvP8YMRMWEXRkqdU36U-fvgkvEn>



Figure 1: Cours Moodle PLECS

2.1 Éléments de la bibliothèque

Pour chaque bibliothèque, les étudiants disposent via le cours Moodle dédié, un ensemble d'informations indiquant :

- Les caractéristiques techniques de l'objet sur lequel est basé le modèle PLECS. Dans l'exemple de la figure 2, les étudiants peuvent directement télécharger le datasheet des plans de charge triphasé résistif et capacitif qui sont présents en salle. Dans notre cas, ce sont des charges de puissance respectives 500 W et 500 VAR.

SPI - Composants passifs RC triphasés

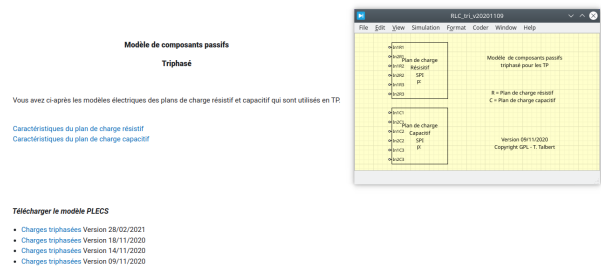
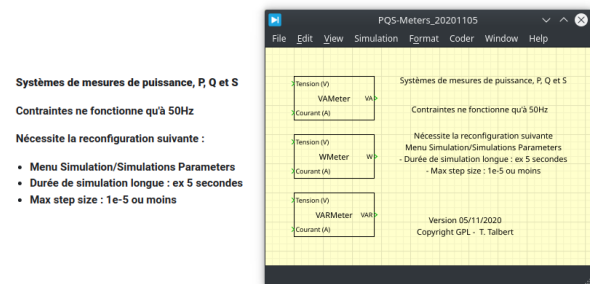


Figure 2: Charges RC triphasés

- Ils peuvent avoir des informations spécifiques pour paramétrer leurs simulations. Dans le cas de l'utilisation des W, VA et VAR meters (Fig. 3), vous devez avoir un nombre de périodes de l'ordre de 3 à 5 fois la période du signal d'entrée. Ainsi qu'un nombre suffisant de points de simulation, ici une valeur maximale entre chaque point de 10^{-5} s.

SPI - PQS Meters



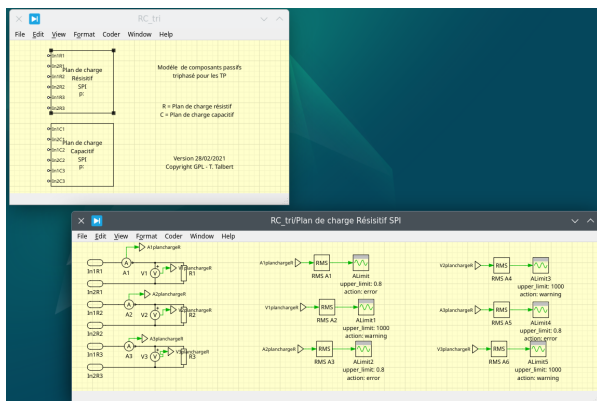
Télécharger le modèle PLECS

- PQS Meters Version 28/02/2021
- PQS Meters Version 18/11/2020
- PQS Meters Version 05/11/2020

Modifié le: dimanche 28 février 2021, 01:53

Figure 3: W, VA et VAR meters modèles

- Les étudiants peuvent accéder à toutes les versions des bibliothèques.
- Si les étudiants sont curieux, ils peuvent avoir accès (en visualisation uniquement) au contenu des différents modèles. Sur la figure 4, est représenté le contenu du modèle employé pour un plan de charge triphasé. Les étudiants peuvent découvrir qu'en plus d'éléments de mesures placés sur chaque résistance, des mesures efficaces sont effectuées pour alerter les élèves des dépassements de valeurs de courant et/ou de tension d'isolation. Ces calculs peuvent amener à de simples warnings, voire des interruptions de simulation.



2.2 Installation et utilisation

Les librairies ci-après peuvent être téléchargées et installées individuellement :

- Alimentation AC
- Alimentation DC
- RLC monophasés
- RC triphasé
- Transformateurs
- POS Meters

L'installation s'effectue simplement, par la décompression des fichiers téléchargés dans un dossier. Puis, dans le menu File/Preferences onglet Librairies de PLECS, par sélection du dossier où se situent les librairies décompressées.

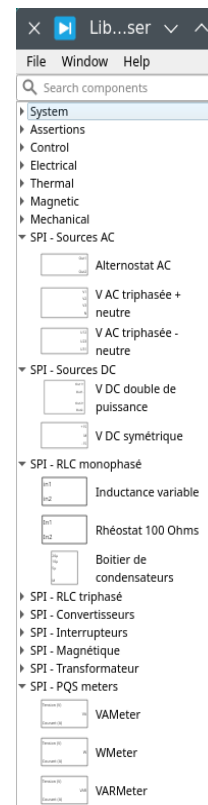


Figure 6: Intégration des librairies dans PLECS

3 ORGANISATION DES TP ET EXEMPLES D'UTILISATION

3.1 Organisation des TP

Une fois les modèles mis en place, le déroulement des séances de TP a été réorganisé de la manière suivante :

1. 15 jours avant le premier TP, le planning expérimentation/simulation est envoyé aux étudiants avec les sujets. Tous les étudiants sont repartis en binômes.
2. Avant la première séance de TP, la salle de TP d'électrotechnique et la salle informatique sont présentées aux étudiants en rappelant les règles de sécurité électrique, les méthodes de câblage, les accès aux ordinateurs, etc.
3. Au début de chaque séance, à partir du planning un étudiant du binôme part en expérimentation et l'autre en simulation.
4. Toutes les 30mn environ (variable en fonction du TP), il est demandé aux binômes de stopper expérimentation et simulation et de faire un point sur les résultats.
5. Au bout d'1h30 (sur des TP qui durent 3h, environ à mi-séance), l'étudiant en simulation passe en expérimentation et inversement.
6. 10 minutes avant la fin de la séance de TP, les binômes sont invités à se réunir pour finaliser les résultats et leur compte rendu.
7. Le compte rendu est à rendre obligatoirement à la fin de la séance de TP.

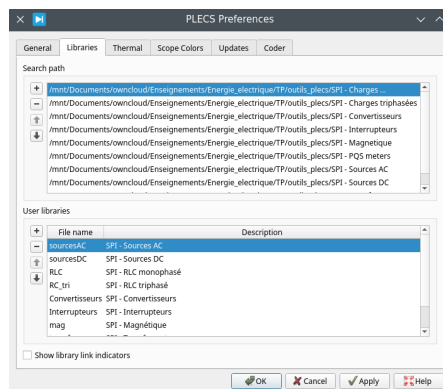


Figure 5: Installation dans PLECS

Une fois installées, elles apparaissent directement dans la fenêtre Library de PLECS, puis peuvent être placées sans limitation dans les simulations de TP.

3.2 Circuits en génie électrique

Les premiers TP, à être transformés dans ce nouveau format, ont été les TP d'électricité et en particulier les TP de :

- Puissance en monophasé ;
- Puissance en triphasé ;
- Circuit magnétique ;
- Transformateur.

Du point de vue contenu, les sujets sont globalement restés les mêmes. On notera comme différences principales entre l'ancienne et la nouvelle version des sujets :
1. Les tableaux de résultats qui prennent en compte les mesures expérimentales et les résultats de simulations

Exemple de question en « Puissance en monophasé »

- Effectuer les mêmes mesures et déterminations que précédemment lorsque la charge est une lampe et qu'elle est alimentée sous $100V_{eff}$ puis sous $230V_{eff}$. Conclure.

100 V_{eff}	$I_{mes} =$	$P_{mes} =$	$F_{P_{mes}} =$
	$I_{sim} =$	$P_{sim} =$	$F_{P_{sim}} =$
230 V_{eff}	$I_{mes} =$	$P_{mes} =$	$F_{P_{mes}} =$
	$I_{sim} =$	$P_{sim} =$	$F_{P_{sim}} =$

Exemple de question en « Puissance en triphasé »

- Mesurer la puissance active d'une phase W . En déduire la puissance totale P absorbée par la charge.

	Expérimentation	Simulation
W		
P		

Tous les étudiants en simulation vont normalement obtenir les mêmes résultats. Côté expérimentation, les résultats vont être systématiquement différents entre les étudiants et par rapport aux simulations. Cela est dû principalement aux erreurs de mesures (digits des multimètres, etc.) et/ou aux erreurs de réglages des composants en salle (réglage de l'alternostat, vieillissement des composants, etc.).

2. Des remises en causes régulières des résultats expérimentaux et simulés obtenus.

Exemple de question en « Puissance en monophasé »

- Calculer pour ces différents cas, la valeur du facteur de puissance F_p . Dans le cas où le résultat est supérieur à 1, expliquer pourquoi ?

Exemple de question en « Transformateur »

- Discuter, à partir des mesures précédentes, de la validité du modèle de transformateur proposé.

Un résultat classique que les étudiants vont devoir comprendre et justifier est : pourquoi parfois le calcul de facteur de puissance en expérimentation est supérieur à 1 et pourquoi en simulation, il ne l'est jamais ?

3.2.1 Organisation du TP

De la même manière que dans la salle de TP, l'étudiant en simulation doit choisir les mêmes composants que ceux de son collègue expérimentateur. Les réglages des différents composants doivent être identiques sous peine d'erreur. Le dialogue au sein du binôme doit être permanent.

Concernant la réalisation des schémas électrique, celle-ci est grandement simplifiée (Fig. 7) est permet de se rapprocher des actions que l'on effectue en salle en expérimentation.

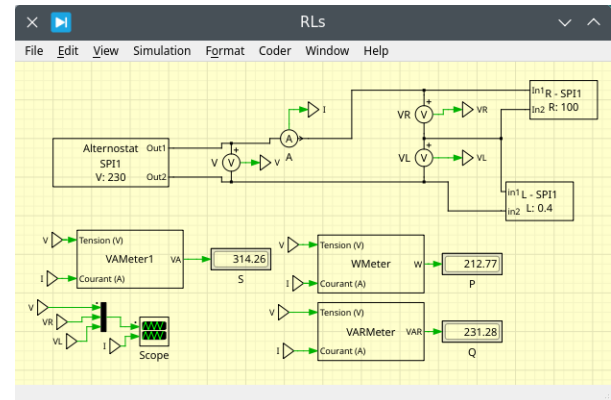


Figure 7: Simulation RL

Chaque composant peut être réglé à l'identique des composants réels avec les mêmes limites. Pour cela, nous avons défini sous PLECS des règles spécifiques pour la saisie de la configuration.

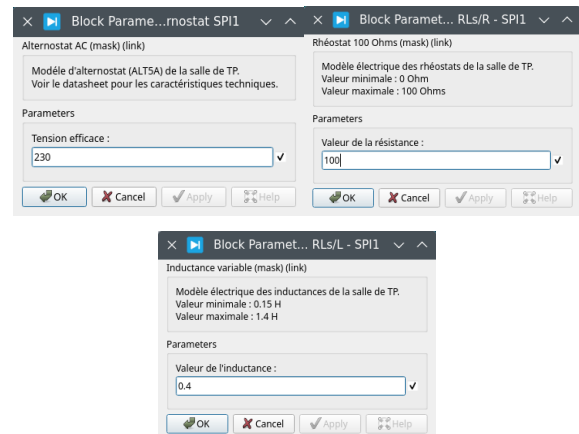


Figure 8: Interface de réglage des composants

3.2.2 Retour d'expérience

Ce format est actif depuis la rentrée 2021. Nous avons eu respectivement 72 et 64 % d'étudiants (21-22 et 22-23) qui trouvaient que le format était « très bien ». 83 et 87 % des étudiants considèrent qu'ils ont appris quelque chose de nouveau. 51 et 74 % des étudiants nous ont indiqué qu'ils devaient constamment dialoguer avec leur collègue qui se trouve dans la salle d'à côté.

En contrepartie, nous avons 34 et 47 % d'étudiants qui considèrent qu'il y a beaucoup plus de travail. Avec comme commentaire : « avant, il y en avait un des

deux qui pouvait faire autre chose ». L'environnement local, 2 salles séparées a été pointé par 24 et 29 % de nos étudiants qui considèrent que c'est un frein à leur travail.

3.3 Circuits magnétiques

La modélisation permet aux étudiants de comprendre les concepts fondamentaux de la transformation d'énergie électrique et de la conception des transformateurs. En utilisant des simulations en temps réel, les étudiants peuvent visualiser les effets des différents paramètres sur le fonctionnement d'un transformateur, ce qui les aide à mieux comprendre les principes physiques impliqués. La modélisation peut également aider les étudiants à déterminer les caractéristiques optimales pour une application spécifique, ce qui est un aspect important pour les futurs ingénieurs.

3.3.1 Organisation du TP

Le TP proposé a nos étudiants de la licence Science Pour l'Ingénieur en 3^{ème} année, a pour objectif l'étude du comportement d'un circuit magnétique et la détermination des pertes fer d'un transformateur. Dans notre expérience pédagogique, nous avons demandé aux étudiants d'effectuer l'étude d'un transformateur inconnu appelé « Transformateur mystère » (Fig. 9).

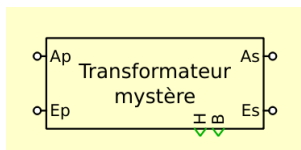


Figure 9: Modèle du transformateur type "boîte noire" fourni aux étudiants.

Pour cela, nous leur fournissons un modèle créé par nos soins, qu'ils doivent caractériser avec les méthodes traditionnellement employées en travaux pratiques : la méthode directe (essai en charge) et la méthode des pertes séparées. Le modèle du transformateur est conçu avec la bibliothèque Magnetics du logiciel PLECS (Fig. 10). Cette bibliothèque permet de construire des composants magnétiques complexes dans le domaine des circuits magnétiques, des éléments de base tel que les enroulements, les noyaux et les entrefers. Les modèles utilisés incluent la saturation et l'hystérésis.

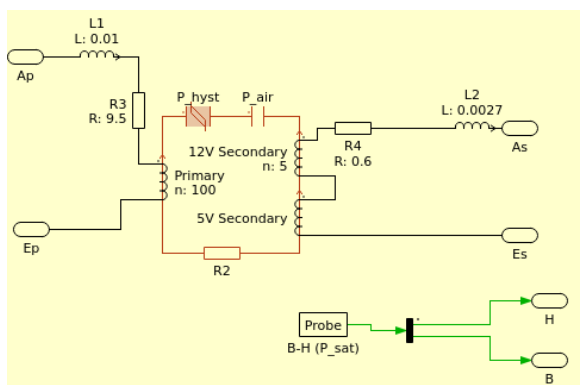


Figure 10: Modèle du transformateur étudié

Les pertes dépendant de la fréquence peuvent être modélisées avec des résistances magnétiques. Les enroulements forment l'interface entre le domaine électrique et le domaine magnétique. Des composants magnétiques moins complexes comme des inductances saturables et des transformateurs monophasés peuvent également être modélisés directement dans le domaine électrique. Au cours du TP, les étudiants peuvent ajuster les paramètres pour visualiser les effets sur le fonctionnement du transformateur (Fig. 11) ce qui aide les étudiants à comprendre les résultats de la simulation de manière plus claire.

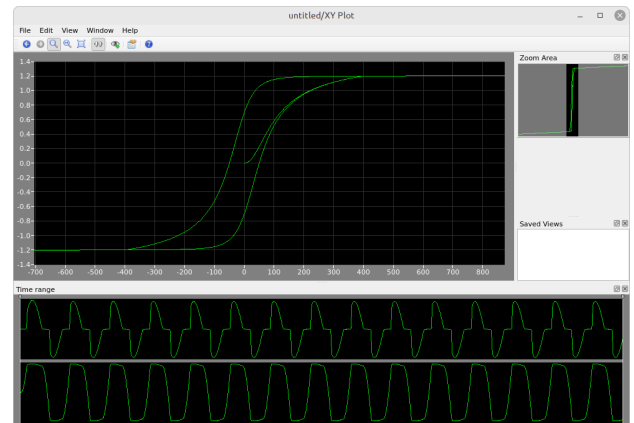


Figure 11: Exemple de visualisation du cycle d'hystérésis.

3.3.2 Retour d'expérience

Le retour d'expérience est très positif. En séance, l'enseignant est amené à redonner les notions de bases sur le cycle d'hystérésis avec la représentation de la saturation et permet de déterminer la perméabilité relative du matériau magnétique ou encore le calcul des pertes par hystérésis, par exemple. Les étudiants peuvent expérimenter avec plusieurs tensions d'alimentations, plusieurs charges ou types de charges.

Grâce à la modélisation des transformateurs avec le logiciel PLECS, les enseignants peuvent offrir aux étudiants une expérience d'apprentissage interactive et immersive qui les aide à mieux comprendre les concepts fondamentaux de l'électricité. Les avantages de cette approche pédagogique sont nombreux, notamment la capacité des étudiants à visualiser les effets des différents paramètres sur le fonctionnement d'un transformateur et la possibilité de déterminer les caractéristiques optimales pour une application spécifique.

4 CONCLUSION

La mise en place de cette modification de fonctionnement de TP a nécessité beaucoup de travail. La réalisation et les tests des bibliothèques ont heureusement été faits pendant la période de COVID19.

Un des points intéressants, de cette mise en place, a été le retour des étudiants qui ont globalement adhéré à la méthodologie. Le second point a été que cette modification est dans la continuité des travaux d'adaptation de la formation aux nouvelles techniques d'enseignements. Le troisième point est qu'il y a maintenant sur

Perpignan, un groupe d'enseignants/chercheurs qui n'hésite pas à tester de nouvelles manières de faire, pour continuer à améliorer la transmission du savoir à nos étudiants.

Il reste cependant de nombreux points d'amélioration. En particulier, la continuité de la transversalité est présente en CM et TD, mais ne l'est pas encore sur l'ensemble des TP. Seuls les composants actifs sont modélisés. Nous travaillons à la mise en place de nouveaux modèles correspondant aux maquettes de convertisseurs statiques (redresseurs, redresseurs commandés, hacheurs, onduleur, alimentation flyback) qui sont réalisées à l'UPVD. Ce qui permettra aux TP d'électronique de puissance de terminer leur migration dans ce nouveau format. Un projet est en cours d'étude pour la mise en place d'une solution technique permettant d'intégrer les structures de commandes des convertisseurs sur des FPGA.

Bibliographie

- [1] T. Talbert, F. Thiery, O. Fruchier, M. Almerge, "Mise en place d'un enseignement transversal", *J3eA volume 21* (2022), DOI: <https://doi.org/10.1051/j3ea/20222043>.
- [2] D. Berthiaume, Conférence et atelier, « *La scénarisation des enseignements* », 20 oct. 2016, UPVD.
- [3] F. Chirat, Conférence et atelier, « *L'évaluation des acquis des étudiants* », 17 nov. 2016, UPVD.
- [4] S. Lédé, Conférence partage d'expérience et atelier, « *La pédagogie par projet* », 10 janv. 2019, UPVD.
- [5] S. Justeau, Conférence et atelier, « *Comment identifier les compétences visées par nos enseignements* », 8 nov. 2018, UPVD.