

AFSCET

Res-Systemica

Revue Française de Systémique
Fondée par Evelyne Andreewsky

Volume 28, printemps 2026

Systemique des mesures

Res-Systemica, volume 28, article 01

Incertitude, précision et pertinence de la mesure

Hilaire Giron

16 pages

contribution reçue le 20 mai 2026



Creative Commons

AFSCET,

Incertitude, précision et pertinence de la mesure

Incertitude, précision et pertinence de la mesure

1. COMMENT ETRE SUR, A L'AIDE DE LA MESURE, DE LA REALITE D'UN PHENOMENE ?

La mesure incarne souvent une certitude, c'est-à-dire, de manière rationnelle, un chiffre quantifie un phénomène que l'on observe et lui donne une existence de « vérité » ! dimensions géométriques, longueur, hauteur, diamètre, ou poids, ou intensité ou vitesse ou position... etc. Si cette mesure est vérifiée, la question concerne la représentation expliquant le phénomène, le modèle, ou la théorie représentative correspondant le mieux à la réalité ! Comment à partir de la mesure peut-on construire le modèle ? Autrement dit la mesure est-elle pertinente ?

A cela, il faut ajouter la distinction essentielle entre grandeur continue et grandeur quantifiée ou discrète. Une grandeur continue peut prendre toutes les valeurs possibles. C'est le cas de toutes les grandeurs de sens commun. Ma voiture peut prendre apparemment toute valeur comprise entre zéro et la valeur limite autorisée ! Une valeur quantifiée ne peut prendre que des valeurs particulières. Cet ensemble de valeurs est dit « discret » par opposition à continu et associé à un nombre entier. On retiendra le caractère totalement inhabituel de ce type de grandeur. Pourrait-on imaginer que la vitesse de la voiture ne puisse fondamentalement prendre que des valeurs multiples de 10km/h par exemple. Que toute autre valeur soit strictement impossible, c'est totalement opposé à notre expérience quotidienne ! Sur la route, devant les différents panneaux de limitations de vitesse, ce serait pratique ! Avec ma voiture quantique, ma q-voiture, dont la vitesse serait quantifiée : 50, 70, 80, 90, 110, 130. Ainsi, il serait physiquement impossible de rouler à 73 km/h, on se bloquerait automatiquement à la valeur la plus proche : 70km/h et l'on pourrait passer à 80km/h par un mystérieux saut !

Cette apparition d'une grandeur quantifiée est entièrement nouvelle en physique. Comment concevoir qu'on ne puisse émettre aucun rayonnement d'énergie inférieure au quantum d'énergie $h\nu$?

Quand on évoque la précision de la mesure, la première idée qui vient à l'esprit est évidemment le principe d'incertitude d'Heisenberg ! Il compense la précision gagnée d'un côté par une perte automatique de précision ailleurs ! On ne peut connaître à la fois la position et la vitesse d'une particule ! Plus l'une des mesures est précise, plus l'autre est floue et réciproquement ! Il est vrai que la mécanique quantique est déstabilisante pour une rationalité scientifique. Si on sait décrire les phénomènes, à cette micro échelle de la nature, on ne sait toujours pas l'expliquer ! Le principe d'incertitude s'oppose au règne de la précision absolue de la mesure. A l'évidence la précision universelle et absolue n'est pas de ce monde ! Qui plus est, la masse varie avec la vitesse selon la formule relativiste $m = m_0 (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$! Sans compter que l'observateur modifie le phénomène observé ! Où est la précision de la mesure et sa pertinence ? Et que mesure-t-on ? On ne mesure non pas le phénomène objectif mais l'interaction de l'observateur et de l'observé ! Où est la pertinence de la mesure ? Nous sommes en pleine systémique et qui plus est synchronique ! Or, les systèmes ne peuvent être pertinemment identifiés que dans leur dynamique, c'est-à-dire de manière diachronique ! On voit par là que parler de précision de la mesure et de sa pertinence est une gageure !

L'astrophysicien Trinh Xuan Thuan évoque cette description de la réalité en termes de potentialités qui ne se matérialiseraient qu'après l'observation. Heisenberg soulignait déjà, dans les années 1930, que les atomes et les particules elles-mêmes ne sont pas réels, comme le sont les objets macroscopiques ! Ils forment un monde de potentialités ou de possibilités plutôt qu'un monde d'objets ou de faits !

On constate bien par-là, que précision et pertinence de la mesure, ne sont pas si évidents !

La tentation permanente est de partir d'un modèle intuitivement semblant vérifier le phénomène et de se lancer dans des équations et calculs qui conduiront à des résultats. Mais sont-ils pertinents ?

2. LES TRAVAUX REMARQUABLES ET EXEMPLAIRES DE MODELISATION DES PLANTES ET DE LEUR CROISSANCE

Pour illustrer cette réflexion, sur l'incertitude, la précision et la pertinence de la mesure, je m'appuie sur les travaux, totalement illustratifs d'une logique systémique, d'un chercheur remarquable que je connais bien. Vous le connaissez sans doute aussi. Les biologistes doivent le connaître. Il est mon filleul à l'Académie des Sciences et des Lettres de Montpellier où il a été officiellement intronisé au mois de juin 2025 et j'ai donc eu l'honneur de la présenter, ce qui m'a permis de découvrir et de comprendre sa méthode.

Il s'agit de Philippe De Reffye, chercheur en modélisation de l'architecture et de la croissance des plantes

Qui est Philippe De Reffye ?

Philippe de Reffye est un ingénieur agronome et docteur ès sciences français, directeur de recherche émérite au CIRAD, spécialiste de la modélisation de l'architecture et de la croissance des plantes.

Il est notamment connu comme fondateur du programme de modélisation de l'architecture des plantes au CIRAD-GERDAT dans les années 1980, à l'origine du laboratoire AMAP de Montpellier. Ses travaux ont articulé botanique, agronomie, écophysiologie, mathématiques appliquées et informatique, avec des applications en simulation 3D des plantes, en agronomie et en foresterie.

Son parcours comprend la création et la direction du laboratoire AMAP, la direction du projet GreenLab en Chine, puis un rôle à l'INRIA dans le projet Digiplante, commun au CIRAD, à l'INRIA et à Centrale Supélec. GreenLab est décrit comme un modèle fonctionnel-structurel de croissance des plantes issu du modèle AMAP développé au CIRAD, reliant architecture végétale et fonctionnement physiologique.

En bref, c'est une figure importante de la modélisation morphogénétique des plantes, au croisement du vivant, de l'informatique graphique et **de la théorie des systèmes**. Il a commencé par l'étude du caféier de Côte d'Ivoire et sa méthode s'est généralisée mondialement, notamment avec ses travaux en Chine.

Le caféier robusta en Côte d'Ivoire n'est pas un exemple secondaire, mais l'un des terrains fondateurs où la méthode a été validée et généralisée. La clé de sa démarche entre autres, est d'avoir utilisé la **méthode inverse**, contre intuitive par rapport aux logiques habituelles pour construire des modèles à partir de nombreuses mesures !

Oui, c'est bien le cœur de sa démarche : **une inversion méthodologique**. Philippe de Reffye ne part pas d'un modèle abstrait que l'on ajuste ensuite à la plante ; il part de l'observation fine de la plante, de ses axes, nœuds, entre-nœuds, méristèmes, ramifications et traces de croissance, puis cherche les outils mathématiques et informatiques capables d'en reconstruire l'architecture dynamique.

Incertitude, précision et pertinence de la mesure

Philippe De Reffye a conduit une action de recherche suivie pendant plus de trente années, dans un cadre pluridisciplinaire, avec comme objectif de mettre au point un **modèle mathématique qui permettrait de modéliser et simuler à la fois l'architecture et la production des plantes en vue d'applications tant en Botanique et en Agronomie qu'en Images de Synthèses**. L'introduction de l'ouvrage qu'il a écrit, « Architecture et croissance des Plantes »¹, résume parfaitement l'esprit et la démarche scientifique qui s'inscrit dans une coopération mondiale !

Comment modéliser la croissance et l'architecture des plantes et pourquoi faire ? Combien de paramètres, nécessaires et suffisants, faut-il identifier dans la mise au point du modèle, pour pouvoir simuler la morphogénèse végétale le mieux possible ? Réciproquement, dans ce que l'on appelle « la méthode inverse », à partir des observations sur une plante, comment retrouver ces paramètres qui pilotent la croissance en biomasse et le développement architectural ? Sans théorie, il n'y a pas de mesures valables... Le sujet est beau et passionnant ! Il est par nature, pluridisciplinaire car il emprunte à la botanique, à l'agronomie, à la physique, aux mathématiques appliquées et à l'informatique. Un spécialiste de ces disciplines ne trouvera, dans cet ouvrage, rien de nouveau dans la sienne. Mais les choix faits dans chacune d'elles les font communiquer et fonctionner ensemble dans un modèle mathématique original par son étonnante adéquation à la diversité du règne végétal.

La modélisation de la croissance et de l'architecture des plantes s'inscrit logiquement dans le cadre d'une discipline récente, dénommée « biologie intégrative ».

Cette démarche est fondamentalement de nature environnementale et répond à nos préoccupations écologiques. Parmi les retombées applicatives, il convient de noter l'application PlantNet, pour le grand public, de reconnaissances des plantes, qu'il a initiée, chargeable sur nos téléphones portables personnels.

Le point décisif est le choix du niveau d'observation : non pas la cellule isolée, ni seulement la plante globale, mais une méso-échelle organisée autour du phytomère, unité élémentaire comprenant nœud, entre-nœud et organes associés, que l'on agrège ensuite en axes puis en architecture végétale, (fig.1, document Philippe De Reffye). Cette architecture est ensuite traitée comme une structure hiérarchique et dynamique, où les cohortes gardent la mémoire du développement et les séries organiques la mémoire de la croissance. C'est une démarche manifestation d'interactions systémiques dynamiques, c'est-à-dire diachroniques !

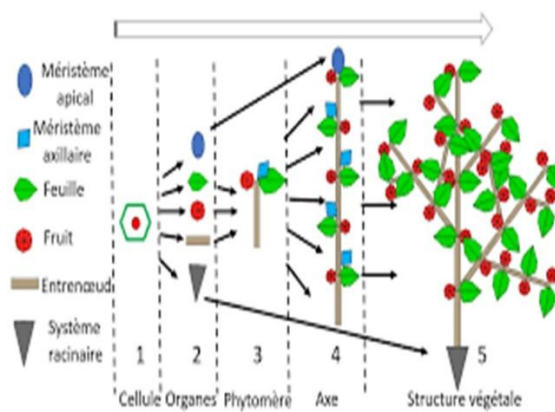


Fig. 1

¹ Architecture des Plantes et production végétale. Les apports de la modélisation mathématique, Philippe De Reffye, Marc Jaeger, Daniel Barthélémy, Francis Houllier, éditions Quae, collection Synthèse

Incertitude, précision et pertinence de la mesure

Le caféier Robusta en Côte d'Ivoire est effectivement un terrain fondateur : les travaux de De Reffye, Snoeck et Jaeger synthétisent des recherches menées dans les plantations de l'IRCC entre 1974 et 1980 sur les clones 182, 126 et 197. Ces travaux utilisent un modèle stochastique fondé sur le fonctionnement probabiliste des méristèmes, permettant de calculer à partir des données de terrain les probabilités de ramification, de croissance, de mortalité et leur évolution temporelle.

On peut donc formuler sa méthode ainsi : observer d'abord la morphogenèse réelle, repérer les régularités visibles, transformer ces régularités en paramètres, puis simuler la plante comme un organisme qui se construit cycle après cycle. Ce n'est pas seulement une modélisation descriptive ; elle vise aussi des applications agronomiques concrètes, comme l'optimisation des espacements, de la taille des arbres et des dates d'intervention culturale pour le caféier.

3. PERTINENCE DE LA METHODE INVERSE POUR LA MESURE PRECISE

Partant de l'observation sur le terrain en Côte d'Ivoire à l'IFCC (Institut Français du café et du cacao), que **l'architecture des caféiers a un rôle évident** en tant que composante du rendement, il a cherché à modéliser la production des cerises comme le résultat du fonctionnement des bourgeons. Le caféier devient une plante modèle sur laquelle **la méthode inverse, est développée pour calculer les probabilités de croissance**, d'avortement et de branchement des méristèmes végétatifs et florifères à partir des mesures faites sur les arbres, au cours d'une thèse d'état défendue à Orsay en 1979. *Il convient de préciser cependant ce qu'est la méthode inverse en sciences appliquées.* La méthode inverse consiste à retrouver les causes ou paramètres inconnus probables à partir des conséquences observées, ce qu'en mathématique, on appellera l'inverse d'un nombre ou d'une matrice. **En somme c'est remonter des effets aux causes !** L'extension est faite aux modèles architecturaux des arbres tropicaux du botaniste Francis Hallé, le mentor de référence qui l'a initié à cette démarche.

Le tout premier programme de simulation de plantes de l'histoire, basé sur le fonctionnement stochastique, c'est-à-dire probabiliste, des bourgeons, avec un tracé de l'architecture spatialisée est développé sur un ordinateur Hewlett-Packard. Ce prototype sera la base de tous les logiciels de simulation de plantes développés par la suite à AMAP (Association Modélisation Arbres et Plantes).

En ce sens, **De Reffye applique une pensée systémique : la plante n'est pas réduite à une équation globale, mais comprise comme un système organisé, multi-échelle, où l'architecture visible résulte d'interactions entre développement, croissance, environnement, biomasse disponible et fonctionnement des méristèmes. Le modèle vient après l'organisme, comme tentative de rendre calculable une forme vivante observée. Il est dynamique, c'est-à-dire diachronique et non synchronique.**

La méthode inverse consiste à partir des observations d'une plante réelle, par exemple dimensions, masses d'organes, images, surface foliaire ou biomasse, puis à rechercher les paramètres cachés du modèle qui auraient pu produire ces observations. C'est l'inverse d'une simulation directe : au lieu de donner au modèle des paramètres pour prédire la croissance, on observe la croissance et l'on déduit les paramètres biologiques ou agronomiques qui l'expliquent.

- **Principe général**

AFSCET,

Incertitude, précision et pertinence de la mesure

Dans un modèle direct, on écrit schématiquement : paramètres + conditions du milieu donnent la croissance simulée.

Dans la méthode inverse, on cherche plutôt : croissance observée donnent les plus probables

Par exemple, si l'on mesure la masse des feuilles, des entre-nœuds, des fruits et la structure architecturale d'une plante, on peut ajuster les paramètres de production et de répartition de biomasse pour que la plante virtuelle ressemble à la plante réelle.

- **Ce que l'on cherche à estimer**

Dans les modèles de croissance des plantes, la méthode inverse peut servir à estimer plusieurs types de paramètres:

- **Paramètres morphologiques:** nombre de phytomères, longueurs d'entre-nœuds, surfaces foliaires, angles foliaires, architecture 3D.
- **Paramètres physiologiques:** efficacité d'utilisation de la lumière, photosynthèse, allocation du carbone, force des "puits" des organes.
- **Paramètres source-puits:** production de biomasse par les feuilles et distribution vers feuilles, tiges, racines, fruits ou graines.
- **Paramètres environnementaux ou agronomiques:** disponibilité en eau, capacité hydrique du sol, stress, nutrition, effet de la densité de plantation.

La revue sur l'inversion en agriculture indique que ces méthodes sont utilisées pour estimer des traits de croissance, l'indice foliaire, la chlorophylle, l'eau disponible pour les plantes ou encore des propriétés hydriques du sol.

- **Exemple avec GreenLab**

Le modèle GreenLab², développé notamment autour des travaux de Philippe de Reffye et collaborateurs, (fig.2), est un bon exemple de modèle fonctionnel-structurel de plante utilisant des méthodes inverses. Il représente la plante comme une architecture faite d'organes, tout en simulant la production et la distribution de biomasse entre ces organes.

Dans GreenLab, on mesure d'abord l'architecture de la plante, par exemple feuilles, entre-nœuds, fruits et phytomères, puis on mesure les masses fraîches ou sèches des organes, et enfin on ajuste les paramètres source-puits pour que le modèle reproduise ces données. L'identification des paramètres peut se faire par une méthode de moindres carrés pondérés, c'est-à-dire en minimisant l'écart entre les données observées et les données simulées.

² Plant Model Greenlab for botany and agronomy, éditions Quae

**modèles architecturaux (F.Halle) simulés
par le modèle GreenLab**

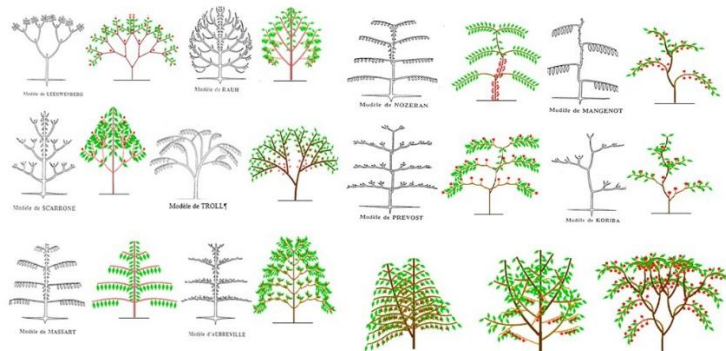


Fig. 2

On voit par-là que la pertinence de la mesure est atteinte par la réflexion préalable sur la plus grande probabilité de croissance de la plante, donc sur sa représentation systémique intégrée de multiples facteurs et de manière diachronique ! Autrement dit, on touche du doigt le lien entre la mesure et la théorie du modèle à construire !

On pourrait, pour simplifier presque la dénommer une méthode bottom-up, cherchant à construire le modèle à partir du désordre chaotique apparent au lieu de partir d'un modèle top-down rationnel dans lequel on fait rentrer la réalité !

- **Lien avec les modèles fonctionnels-structurels**

Les modèles fonctionnels-structurels de plantes, ou FSPM, combinent la forme spatiale de la plante avec ses fonctions biologiques comme la photosynthèse, l'allocation du carbone, la croissance des organes ou les échanges avec l'environnement. Ces modèles sont particulièrement adaptés à la méthode inverse, car ils permettent de relier des observations visibles, comme l'architecture, à des processus invisibles, comme la compétition entre organes pour la biomasse.

- **En résumé**

La méthode inverse en biologie de modélisation des plantes est donc une démarche d'inférence : elle part de la plante observée pour retrouver les paramètres internes du modèle qui expliquent sa croissance. Elle est précieuse parce que beaucoup de mécanismes importants, comme la force de puits d'un fruit, l'efficacité photosynthétique ou l'allocation de biomasse, ne sont pas directement observables mais peuvent être estimés à partir de mesures bien choisies.

On pourrait dire, en termes systémiques, que la méthode directe simule le devenir d'un système végétal à partir de ses règles, tandis que la méthode inverse reconstruit les règles probables à partir des formes et trajectoires observées.

La différence essentielle est donc la direction du raisonnement.

AFSCET,

Incertitude, précision et pertinence de la mesure

Dans le **modèle direct**, on part des règles supposées de la plante pour produire une plante virtuelle. Dans le **modèle inverse**, on part de la plante réelle pour retrouver les règles cachées qui ont probablement gouverné sa croissance.

On peut le résumer ainsi :

- Direct : règles internes → forme et croissance observées
- Inverse : forme et croissance observables → règles internes probables

Dans GreenLab, par exemple, on peut mesurer les masses des organes et l'architecture de la plante, puis chercher les paramètres de production et de répartition de biomasse qui permettent au modèle de reproduire ces mesures. C'est une sorte d'anamnèse mathématique" de la plante: on reconstruit son fonctionnement à partir des traces visibles de son développement.

Un retour sur la botanique était nécessaire car le logiciel AMAP ne pouvait pas prendre en compte les nouvelles connaissances développées en Botanique par les élèves de Francis Hallé recrutés à AMAP. Ces particularités architecturales des arbres provenant du fonctionnement des bourgeons devaient être modélisées. Il s'agit plus particulièrement des notions d'âge physiologique, de pré et néoformation, d'acrotonie, basitonie, de poly-cyclisme et de rameau anticipé. En travaillant sur des arbres complexes comme les ormes, les peupliers, **l'équipe a pu mettre au point les fonctions stochastiques Adhoc, pour simuler correctement ces architectures.** La fameuse méthode inverse, déjà citée, qui permet de calibrer les paramètres à partir des mesures a été développée en parallèle. **Philippe De Reffye a joué un rôle majeur dans la création de la notion « d'axe de référence » qui permet la simulation des architectures complexes en modélisant la notion d'âge physiologique.**

Avec l'appui des chercheurs AMAP Yves Carraglio botaniste et Hervé Rey Agronome, l'informaticien Jean Francois Barczy d'AMAP a développé le logiciel AMAPsim qui utilise cette notion et qui permet de simuler finement le développement tridimensionnel des arbres les plus complexes. Une première application a été faite en écophysiologie sur l'interception de la lumière par les maquettes 3D et en télédétection sur l'interception des ondes radar.

L'axe de référence modélise donc le tronc principal de l'arbre. Il structure la croissance, la ramification et la distribution des ressources dans les modèles de croissance et simule leur développement architectural et physiologique dans le temps.

Les modules Archimède et AMAPsar ont été développés couplés à AMAPsim.

Le recrutement à AMAP des mathématiciens a permis l'affinement des méthodes inverses initiées qu'il a développées, sur l'architecture et la manipulation informatique des structures végétales (logiciel AMAPmod).

Plusieurs instituts techniques agricoles, passent des conventions avec le laboratoire pour étudier les espèces cultivées tempérées (arbres fruitiers, forestiers) en parallèle avec les départements du Cirad sur les espèces tropicales.

Incertitude, précision et pertinence de la mesure

Une avancée vers l'écophysiologie était nécessaire, car si les plantes simulées étaient conformes aux besoins de la botanique et de l'image de synthèse, elles n'étaient d'aucune utilité pour l'agronomie car la notion de fonctionnement physiologique était absente et seulement celui des bourgeons était modélisé, ce qui couplé à la géométrie est suffisant pour dessiner l'arbre. **Les organes mis en place par cette technique sont purement décoratifs et non fonctionnels**

Un groupe de travail, est alors constitué en partenariat avec des membres de l'INRA et du CIRAD conduisant à la création du **laboratoire commun AMAP CIRAD-INRA**. Ce rapprochement a permis la formation d'un groupe de travail formé de Philippe De Reffye, agronome, d'un informaticien, d'un mécanicien et d'un mathématicien François Houllier de l'ENGREF (futur directeur d'AMAP et de l'INRA). François Houllier apportait à AMAP ses connaissances en Ecophysiologie forestière et les résultats qu'il avait obtenus avec Jean Michel Leban (INRA) sur les empilements de cernes dans les troncs en liaison avec le développement des houppiers. Cela a abouti à la création **du modèle source puits AMAPhydro** dont la **simulation pouvait rendre compte de la dynamique de la croissance spatialisée de l'arbre en biomasse et de l'empilement des cernes étendu à tous les axes**.

Le logiciel permettait de plus de simuler la compétition spatiale en Forêt. Thierry Fourcaud a développé au cours de sa thèse à Bordeaux les aspects mécaniques de l'équilibre de l'arbre sur pied en modélisant l'emplacement du bois de réaction (lié à la qualité du bois) mis en place par l'arbre au cours de sa croissance, ce qui a donné le module AMAPméca couplé à AMAPhydro.

Parallèlement les premières méthodes inverses pour calculer les paramètres des fonctions sources-puits ont été développées sur cotonnier par Stéphane Chemouny (DEA informatique) par Philippe De Reffye en 1997 en utilisant la méthode heuristique des moindres carrés simulée, malheureusement coûteuse en calcul. **Il convient de préciser que les fonctions sources-puits décrivent la biomasse, principalement issues de la photosynthèse, produites par les organes sources que sont les feuilles et distribués vers les organes puits jeunes feuilles, tiges, racines, fruits, etc.**

Il convient de bien comprendre la signification de ce modèle ! Source correspond aux secteurs à ressources abondantes et puits, aux secteurs à ressources limitées ! Les habitats sources assurent la pérennité des habitats puits. *A titre indicatif, cette méthode mathématique écophysiologique est appliquée aux questions d'analyse des flux de migrations humaines sur terre. Il est facile d'en comprendre la raison, notamment avec les **puits démographiques de l'occident** !*

Ce modèle aide à comprendre la répartition des espèces, la gestion des habitats et la conservation de la biodiversité dans des paysages fragmentés.

Les coopérations du laboratoire AMAP avec les départements forestiers (Nancy, Bordeaux ,... et d'arboriculture (Montpellier) de l'INRA deviennent soutenues et iront en s'accroissant.

Le bilan de ces **recherches en foresterie** a été jugé **suffisamment intéressant** à Yves Birot pour nommer l'équipe AMAPhydro **au prix Wallenberg en 1998**. Il convient de rappeler que **le Prix Marcus Wallenberg est considéré comme le prix Nobel du secteur forestier**. Il récompense des avancées majeures dans la recherche et l'innovation forestières.

Incertitude, précision et pertinence de la mesure

Les résultats majeurs obtenus au Liama sont la factorisation du modèle AMAP (qui était basé sur la simulation informatique) et qui est devenu le modèle mathématique nommé GreenLab. Ce modèle garde les mêmes connaissances botaniques et ecophysiologiques d'AMAP, mais remplace le code de simulation par des équations de productions déduites de l'Automate Botanique de GreenLab. **Le résultat de cette factorisation est que le même arbre qui demande 90 minutes de calcul par AMAPsim est obtenu en moins d'une seconde (Fig.3, Liama).** Le temps de calcul d'un arbre n'est plus proportionnel au nombre d'organes à fabriquer, mais proportionnel au temps si on ne s'occupe que de l'architecture et au carré du temps si on intègre la croissance en biomasse. Ceci permet au concept d'architecture de devenir un outil applicable à l'Agronomie. De plus ces équations sont dérivables ce qui donne accès aux méthodes des mathématiques appliquées concernant la méthode inverse, l'optimisation et le contrôle, ce que ne permettait pas « le tout simulation ». Ces résultats ont été obtenus en trois thèses successives en biseau sous la direction de Philippe de Reffye, par les doctorants mathématiciens et informaticiens Zhao Xing, Yan Hong Ping et Kang MengZhen. Cette dernière étendant au domaine stochastique les résultats obtenus par les deux premières. Une quatrième thèse (Wu Lin) en alternance Liama- Inria Grenoble, a appliqué les méthodes de contrôle optimal au modèle GreenLab sous la direction de François Xavier Le Dimet, mathématicien de l'Inria qui dirigeait le projet IDOPT

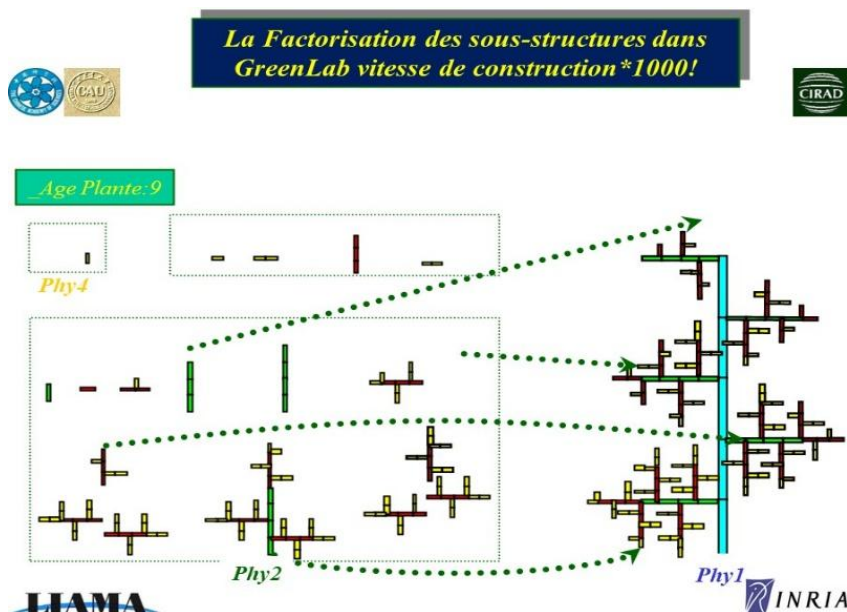


Fig.3

Mais l'intégration dans le modèle d'un fonctionnement de type sources puits, ne concernait que les arbres qui constituaient le sujet principal d'AMAP. La demande des Chinois se portait surtout sur les grandes cultures, et les premières applications de GreenLab se sont faites sur celles-ci (Maïs, Tournesol, riz, tomate,...). Les résultats majeurs obtenus à la Chinese Agriculture University (CAU) sont la calibration du modèle GreenLab sur les plantes cultivées, grâce à l'investissement des professeurs associés Guo Yan et Zhang Baogui. Une première thèse avec Zang ZhiGang sous votre direction, Monsieur, a permis l'introduction de la méthode des moindres carrés généralisés à forte convergence (moins de 10 itérations sont nécessaires), pour la calibration des paramètres des fonctions sources puits du modèle.

Incertitude, précision et pertinence de la mesure

Un logiciel prototype nommé « Cornerfit » a été développé par le doctorant. La méthodologie baptisée « multi fitting » permet d'analyser la croissance de la plante en s'appuyant sur la mesure des plantes au cours des différents stades successifs du développement. Une douzaine de paramètres stables permet de suivre la trajectoire de la croissance de la plante en calculant l'entrée du carbone et sa distribution dans les organes en expansion (feuilles, entrenœuds, fruits, racines) à chaque cycle de croissance en intégrant de plus les données de l'environnement (température, lumière, eau, densité). Ces paramètres sont d'excellents candidats pour la sélection végétale et l'optimisation des itinéraires cultureux (irrigation, traitements, éclaircie). La calibration a été réalisée avec succès sur les plantes cultivées au cours de thèse successives à la CAU, dirigées par les professeurs chinois et Philippe De Reffye : Le Maïs avec Ma Yuntao, le cotonnier avec Li Dong, la tomate avec Dong Xiao Xue (avec une interaction avec le calcul de l'interception de la lumière avec le logiciel de l'INRIA Plantrad de Cyril Soler), le riz avec Bang You, le pin avec Wang Feng. Cette action de coopération avec la CAU continue toujours à se développer fortement par l'arrivée de nouveaux doctorants chaque année. La CAU est un incomparable partenaire pour la validation du modèle GreenLab. Au cours de cette activité Vous avez été nommé professeur invité à la CAS et la CAU.

4. DETERMINANTS CLES DE LA MODELISATION

En résumé, On peut citer comme innovations étalées sur trente années et qui ont toutes données lieu à de nombreuses publications :

- La modélisation du fonctionnement stochastique des bourgeons, basés sur les théories du renouvellement, de la fiabilité et des chaînes de Markof, suite de variable aléatoires **modélisant l'évolution d'un système**, qui permettent de rendre compte de la variabilité dans l'architecture d'une plante.
- Les règles géométriques du développement d'une architecture spatialisée et de sa visualisation qui permet la jonction avec l'image de synthèse.
- La modélisation de l'âge physiologique des bourgeons sous forme d'automate botanique qui contrôle les étapes de la différenciation des axes (Axe de Référence d'AMAP, Automate de GreenLab) et qui permet de suivre la dynamique du développement d'un arbre (mis en place des axes). Une observation clé caractérise ce phénomène, les arbres qui se développent selon un axe vertical, type sapin, ou celui pour lequel il y a un buissonnement par des branches larges.
- L'établissement des équations des fonctions **sources-puits** de la croissance végétale basées sur l'acquisition et la **distribution de la biomasse au niveau des organes et qui permettent de suivre les croissances primaires (expansion) et secondaires (cernes) de ceux-ci**. En même temps la mise au point des règles de l'interaction croissance développement qui donne à la plante sa plasticité.
- La **factorisation** des structures végétales qui permet d'abaisser considérablement le temps de calcul de l'organogénèse et de la photosynthèse qui devient indépendant du nombre d'organes à fabriquer et seulement proportionnel au temps (ou carré) de développement. Ce formalisme mathématique permet l'utilisation de la notion d'architecture des plantes en production végétale.

Incertitude, précision et pertinence de la mesure

- La mise au point des méthodes inverses pour calculer à partir des mesures sur les plantes, les paramètres du développement (analyse des cimes) et ceux de la croissance (analyse des séries organiques).
- Le passage de la plante au peuplement en optimisant la compétition spatiale dans les équations du modèle, qui permet d'aborder une production végétale basée à la fois sur les modèles de l'Agronomie et de la Botanique et de visualiser les « paysages fonctionnels ».
- Le développement logiciel des premiers prototypes qui ont permis aux informaticiens des équipes AMAP, LIAMA-CAU et DIGIPLANTE d'écrire des logiciels d'applications performants pour l'image de synthèse et l'agronomie (AMAP, AMAPsim, et DIGIPLANTE en France, CORNERFIT, GREENSCILAB, QINGYUAN en Chine). Vous avez développé vous-même, Monsieur, entre 2014-2020 le logiciel **GLOUPS** (GreenLab Operateur Universel de Plantes Simulées). Corrélativement votre action a permis le développement au Cirad du logiciel d'imagerie médicale Corpus 2000 intégré sur les scanners Toshiba, et du logiciel PlantNet de reconnaissance de plantes en partenariat avec l'INRIA.
- Cette démarche est à l'origine de colloques internationaux sur la modélisation de l'architecture des plantes organisés en Chine par le Liama et le Cirad, dont le tiers des contributions sont des résultats de recherches sur le modèle.

Cette méthode est également à l'origine de la création des PME

- BIONATICS (urbanisme, 15 personnes), Cette société toujours active distribue des logiciels partout dans le monde pour visualiser les projets d'aménagement en Urbanisme et Paysagisme. Ce logiciel a été primé aux Etats Unis comme un des meilleurs logiciels d'images de synthèse sur les plantes. C'est ce logiciel spécialisé dans la croissance des plantes et de paysages, d'abord expérimenté dans les compagnies : TDI, ALIAS, WAVE FRONT, SOFTIMAGE, 3DSTUDIO, qui est à l'origine de cette société.
- INTRASENS (imagerie médicale, 50 personnes). Très active et créée à Montpellier, elle est le résultat des travaux en imagerie médicale au laboratoire AMAP avec la Faculté de médecine de Montpellier
- et bien sûr PlanNet logiciel de reconnaissance des plantes, disponible en application pour le grand public sur téléphone portable.

Grâce à ces travaux, il est possible ainsi d'optimiser le phénomène de croissance des plantes et de consommation de ressources en eau et en biomasse ainsi que leur photosynthèse ! Ce sont des apports fondamentaux à l'ensemble de l'écosystème de la planète dans de nombreux domaines.

5. SUBTILITE DES EXIGENCES DE LA METHODE SCIENTIFIQUE

Changeons de domaines

Revenons maintenant au plan scientifique, il est intéressant de faire référence à deux phénomènes :

- L'anomalie de la trajectoire de la planète Mercure à son périhélie,
- La découverte du boson de Higgs

Incertitude, précision et pertinence de la mesure

La trajectoire d'une planète isolée autour du Soleil, déterminée selon la théorie newtonienne, est une ellipse invariable. Cependant, l'observation montre que le périhélie d'une planète (point le plus proche du Soleil au cours de sa trajectoire) se déplace lentement au cours des siècles ; son orbite n'est pas fixe mais tourne lentement dans son plan.

- En ce qui concerne la planète Mercure, les calculs de mécanique newtonienne compte tenu de l'action perturbatrice des autres planètes, donnent une avance séculaire de 5557 secondes d'arc environ. Or les observations astronomiques montrent que cette avance est en réalité de 5600 secondes d'arc environ. Ce résidu, très faible, $\delta\bar{\omega}$ de 43 secondes, est inexpliqué par la théorie de Newton. Faut-il négliger cet écart, somme toute insignifiant, et conforter la théorie de la mécanique de Newton ou s'interroger sur la pertinence de la théorie et en imaginer une autre ? Eh bien, c'est la seconde hypothèse qu'il fallait envisager et ne pas récuser les faits de ce faible écart. C'est donc, grâce à la théorie de la relativité d'Einstein, que cet écart a pu être expliqué. C'est donc la déformation de la nappe de l'espace-temps qui est la bonne théorie explicative et non pas la mécanique newtonienne. **Le constat est clair ! Une mesure précise donnait lieu à une interprétation non pertinente, il fallait changer de théorie !**

- Avec le boson de Higgs, c'est exactement l'inverse ! Peter Higgs et François Englert, entre autres, ont introduit dans leurs calculs, un paramètre expliquant pourquoi certaines particules élémentaires ont une masse et d'autres n'en ont pas, comme le photon et ceci pour respecter la théorie du modèle standard. Le Modèle standard n'explique pas l'origine de la masse, ni pourquoi certaines particules sont très lourdes alors que d'autres ne possèdent aucune masse. Cependant, les théoriciens Robert Brout, François Englert et Peter Higgs ont proposé une théorie pour résoudre ce problème : les particules acquièrent une masse à travers le mécanisme de Brout-Englert-Higgs, en interagissant avec un champ invisible, dit « champ de Higgs », présent dans tout l'Univers. Celles qui interagissent fortement avec le champ de Higgs sont lourdes, celles qui n'interagissent que faiblement sont légères, voire sans masse. Autrement dit cette interaction donne de la masse aux particules. C'est ainsi que l'hypothèse de l'existence du boson de Higgs est faite. Mais fallait-il pouvoir encore le vérifier expérimentalement ! Cette découverte et l'hypothèse correspondante du boson de Higgs sont imaginées en 1964. Quelques centaines de millions de francs suisses plus tard, c'est-à-dire exactement 48 ans plus tard, après les investissements conséquents pour augmenter la puissance du Grand Collisionneur de Hadrons, (LHC) du CERN à Genève, est mis en évidence, grâce à cette puissance précisément, l'existence de ce boson en 2012. Peter Higgs et François Englert reçoivent le prix Nobel en 2013.

Selon les observations expérimentales et leur confrontation aux théories, c'est soit la théorie qu'il faut changer, soit l'expérience qu'il faut réitérer en permanence pour parvenir à des résultats cohérents avec la théorie. On voit par-là, le discernement subtil nécessaire aux scientifiques pour parvenir à un résultat pertinent, cohérent et reconnu ! **Toujours l'incertitude, la précision et la pertinence de la mesure par rapport à l'explication du phénomène !**

Interpellation de nos certitudes et surtout de celles des physiciens de physique fondamentale, l'exemple de l'enquête, faite par Sabine Hossenfelder, est très illustrative de cette problématique ! Elle en fait la synthèse dans son livre : « Lost in Maths » !

Incertitude, précision et pertinence de la mesure

En effet, Sabine Hossenfelder³, scientifique chercheuse en physique fondamentale à l'Institut des Etudes Avancées de Francfort, spécialiste de la gravité quantique, effectue une enquête auprès des physiciens les plus avancés en matière de théories modélisant les représentations du monde et de notre cosmos, Energie noire, matière noire, multivers, mécanique quantique, théorie des cordes, espace à n dimensions ..., tous les modèles sont abordés de manière critique par l'observation des faits expérimentaux et des « discours » des théoriciens. Elle constate, à l'écoute des savants qu'elle interview, comme Stephan Weinberg, entre autres, notamment aux Etats-Unis, que les critères d'évaluation de leurs modèles sont de plus en plus déconnectés de la vérification expérimentale. Ils reposent dans la plupart des cas sur l'élégance et la simplicité de l'équation et la beauté « naturelle » de la représentation qui en résulte. La vérification expérimentale étant très difficile, voire impossible puisque toute représentation, à ce niveau de réalité, n'a plus de corrélation évidente avec notre intuition logique humaine, **l'élégance mathématique devient dès lors une sorte de vérité, de certitude, qui s'impose comme étant scientifique.**

Sabine Hossenfelder montre qu'il y a là un risque de glissement vers des croyances avec tous les débats habituels de batailles de certitudes. Elle constate également que les travaux à l'aide du super accélérateur du CERN à Genève ne débouchent que sur très peu de résultats depuis la découverte du boson de Higgs.

Partant de la cartographie de l'existant à partir du « modèle standard », elle décrit avec rigueur et humour les rêves des physiciens en se moquant également d'elle-même en s'interrogeant sur les résultats effectifs de ses travaux de recherche qu'elle estime peu probants.

Comme beaucoup de ses collègues à travers le monde, elle s'aperçoit qu'elle ne comprend plus la physique et qu'elle est perdue dans des expressions mathématiques « hors sol ».

Sa méthode d'exposé critique est très pédagogique. Chaque chapitre se termine par un résumé des idées clés qu'elle y développe, ce qui est fort utile pour le lecteur. Enfin, elle termine son ouvrage par une interpellation du lecteur, l'appelant à la rigueur de la méthode scientifique et en lui demandant de s'interroger lui-même sur ses propres représentations du monde et son sens du doute. Elle donne ses recommandations en insistant sur le fait de bien analyser les résultats négatifs des recherches qui sont très utiles pour la progression de la réflexion. Elle insiste sur le fait de se méfier des médias et des courants de pensées dominants. L'esprit critique est, en conséquence, essentiel et il est nécessaire d'avoir des regards croisés, contradictoires et transdisciplinaires.

A notre époque de diffusion d'informations de toutes sortes plus ou moins vérifiées, où les affirmations intempestives dogmatiques, (pensons au climat), ont plus de poids que la modestie de l'esprit scientifique, cet ouvrage fait du bien et exalte la rigueur intellectuelle, l'humilité, le dialogue et l'ouverture d'esprit.

Au fond, cet ouvrage démontre qu'il convient en permanence de se méfier de ses croyances conscientes ou implicites qui conduisent à la déformation de la méthode scientifique. Le titre du livre est fort bien choisi.

Et toujours, entre le signifiant et le signifié, la mesure pour être pertinente exige de la modestie et de la rigueur intellectuelle et d'accepter de sortir d'un confort !

³ Lost in Maths, Comment la beauté égare la physique, Sabine Hossenfelder, édition Les belles lettres, avril 2019, 340 pages.

Incertitude, précision et pertinence de la mesure

Plus près de nous, l'idéologie de l'intelligence artificielle, avec les certitudes de certains sur le transhumanisme et le post-humanisme, avec ce concept de point critique de singularité, bible des transhumanistes, érigeant en vérité une évolution quasi obligatoire de l'humanité vers le statut de machine, donne lieu aux mêmes intégrismes. En effet, le terme de singularité, comme vous le savez sans doute, est le point à partir duquel les tenants de cette thèse estiment que l'homme va être dépassé par l'intelligence artificielle, donc par la machine et que, en conséquence, il est urgent, si nous ne voulons pas être dépassés par ces machines, de procéder à l'hybridation de la biologie avec des puces numériques de telle manière que l'homme symbiotique, que nous deviendrons, domine toujours la machine uniquement numérique. C'est la thèse d'Elon Musk qui investit lourdement sur ces puces électroniques, biotechnologiques à greffer sur nos neurones. Il convient de lire, à ce sujet, l'excellente analyse de Bertrand Vergely, « *La destruction du réel, ou la fin programmée de l'humain a-t-elle commencée ?* »⁴ qui interpelle et nous alerte sur le danger de cette nouvelle idéologie. Par contre, le livre magnifique de Joël de Rosnay : « Je cherche à comprendre »⁵ prend, en quelque sorte, le contre-pied de la thèse de Bertrand Vergely. Tout en mesurant les risques du transhumanisme, il trace une perspective très teilhardienne de l'évolution et de la philosophie des sciences estimant au contraire que le numérique et l'IA vont nous conduire à un « hyper-humanisme » pas loin de « l'ultra-humain » de Teilhard.

○ **Le réel voilé**

Qui plus est, comme le dit le physicien et philosophe Bernard d'Espagnat, le réel est voilé⁶. Il est inatteignable par le principe d'incomplétude et le théorème de Gödel. Nous sommes à la fois sujet et objet, car nous sommes faits des matériaux que nous observons. Nous n'observons que des interactions entre nos capteurs physiques et intellectuels, plus ou moins sophistiqués par nos prothèses numériques et notre environnement. C'est la question de l'évènement « en soi » qui est posée. Existe-t-il indépendamment de l'observateur Emmanuel Kant⁷, comme Bernard d'Espagnat, répond non. Que pouvons-nous savoir ? question classique de la connaissance, examinée notamment par Hume.,. L'objectivité absolue n'existe donc pas. Il faudrait que nous sortions de l'épure pour avoir une vue extérieure à ce que nous observons. Bernard d'Espagnat parle d'ailleurs d'objectivité forte et d'objectivité faible⁸ !

Nous ne faisons que codifier ce que nous comprenons des phénomènes observés de manière analytique par la segmentation des connaissances en domaine disciplinaire de représentations, ce qui est évidemment indispensable, pour essayer de les comprendre avec des méthodes et des outils différents selon la discipline concernée.

Mais le Réel, lui, n'est pas segmenté en disciplines, il est, si j'ose dire l'intégrale triple de l'ensemble des disciplines qui ne peuvent pas être séparées. Le Réel ne connaît pas la distinction entre la physique et l'au-delà aristotélien de la physique, c'est-à-dire la métaphysique.

Par conséquent, chacune des disciplines ne donne que des représentations, des vues partielles et limitées du réel. Chaque discipline, de par sa vue analytique selon un axe particulier, est réductrice et simplificatrice du réel.

⁴ La destruction du réel : la fin programmée de l'humain a-t-elle commencée ? Bertrand Vergely Le Passeur éditeur , (avril 2018)

⁵ Je cherche à comprendre, Joël de Rosnay, Les codes cachés de la nature et de l'univers, octobre 2016, éditeur, Les Liens qui Libèrent

⁶ Le réel voilé, Bernard d'Espagnat, Analyse des concepts quantiques, Ed. Fayard, 1994

⁷ Emmanuel Kant, La Critique de la Raison pure, 1781

⁸ Bernard d'Espagnat, Traité de physique et de philosophie, Ed. Fayard, octobre 2011

6. PHILOSOPHIE DES SCIENCES, L'ÉPISTEMOLOGIE

La philosophie s'intéresse surtout à l'essence des choses et la "science" à la manifestation des choses et à leurs mécanismes. La philosophie exige une très grande rigueur intellectuelle, autant que les sciences dites dures. Mais le philosophe a besoin de connaître l'état des connaissances des sciences, tout du moins leurs résultats pour exprimer une analyse philosophique sur l'essence des choses.

C'est l'épistémologie !

C'est aussi peut-être un débat sartrien. Pour Sartre, l'existence précède l'essence en opposition à la vision philosophique traditionnelle, notamment Platon où l'essence précède l'existence.

La philosophie est pour moi une sorte de mathématique très rigoureuse pas sa logique qui essaye de dégager les structures universelles pouvant caractériser la nature des choses.

Pour parler de Changeux et sa vision matérialiste affirmée, il dépasse son rôle de scientifique pour l'affirmer. Son affirmation est de l'ordre de la croyance. La science ne peut rien dire, tout du moins aujourd'hui sur cette affirmation. Chacun peut s'affirmer matérialiste ou spiritualiste ou les deux comme Teilhard, Esprit-Matière ou dualité de la matière et de l'esprit chez Platon.

Il est d'ailleurs assez intéressant d'observer l'évolution des choses entre les biologistes et les physiciens. Les biologistes sembleraient plutôt "matérialistes" alors que les physiciens deviendraient plutôt "spiritualistes". Plus on descend dans l'infiniment petit, moins on trouve de la matière. La mécanique quantique est passée par là et le modèle standard aussi ! D'ailleurs aujourd'hui, personne n'est capable de définir ce qu'est la matière. Il est alors assez paradoxal de s'appuyer sur un concept que l'on est incapable de définir.

Où est l'information dans l'interaction entre les particules et le champ de Higgs qui précisément prennent ou ne prennent pas de masse en le traversant. Comment expliquer l'intrication des particules liées dans le même état d'information ? Et j'en passe.

Nous abordons ipso facto, la problématique de la réalité en soi, tel qu'en parle Kant dans la critique de la raison pure. La finesse d'analyse touchant à la problématique de l'épistémologie, de l'écoute, de la clarification du langage de spécialistes pour se faire comprendre par les non spécialistes du domaine concerné et à la modestie qu'il convient d'avoir en matière d'approche du réel montrent bien à quel point, il est impossible d'avoir des certitudes.

L'objet en soi n'existe pas sans l'observateur. Je fais référence au philosophe contemporain Simondon. Il fait une vive critique du substantialisme et de l'être déjà constitué d'avance. Il affirme à l'inverse **l'être comme " devenir"**⁹. L'être n'est pas une donnée fixe mais une opération dynamique de transformation. De plus, **c'est surtout la notion de "relation" qui a la primauté sur la constitution du devenir de l'objet**, qui s'opposerait au sujet pensant, pour nous mener vers une **objectivité ontogénique**, un monde non pas fait d'êtres fixes, mais **de devenirs et de relations**. Dans ce cas, on ne peut pas séparer l'objet et le sujet. Nous ne formons qu'un seul macro-éco-système planétaire, voire galactique, en interactions !

⁹ Gilbert Simondon, L'individuation psychique et collective

AFSCET,

Incertitude, précision et pertinence de la mesure

L'objectivité absolue est donc impossible. Le réel a un instant t est impossible à saisir puisqu'il est en interaction permanente de la nano particule jusqu'à l'Univers entier. En conséquence, le réel n'est pas atteignable. Il est voilé comme le dit fort bien Bernard d'Espagnat.

Incertitude, précision et pertinence de la mesure, voilà une trilogie qu'il convient d'avoir à l'esprit pour appréhender la réalité d'un phénomène observé !

Hilaire GIRON,

13 mai 2026