



HAL
open science

Validité écologique : origines du concept et application pour les neurosciences cognitives et cliniques

William Vallet

► To cite this version:

William Vallet. Validité écologique : origines du concept et application pour les neurosciences cognitives et cliniques. *Annales Médico-Psychologiques, Revue Psychiatrique*, A paraître, 10.1016/j.amp.2024.10.007 . hal-04949513

HAL Id: hal-04949513

<https://hal.science/hal-04949513v1>

Submitted on 15 Feb 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



Disponible en ligne sur

ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

EM|consulte
www.em-consulte.com



Article original

Validité écologique : origines du concept et application pour les neurosciences cognitives et cliniques

Ecological validity: Conceptual Origins and Application in Cognitive and Clinical Neuroscience

William Vallet ^{a,b,*}, ^c

^a Centre Hospitalier le Vinatier, 69500 Bron, France

^b CH Le Vinatier, 95, boulevard Pinel, PSYR2 team, bâtiment 416, 1st floor, 69500 Bron, France

^c Université Claude-Bernard Lyon 1, Centre national de la recherche scientifique, Institut national de la santé et de la recherche médicale, Centre de recherche en neurosciences de Lyon U1028 UMR5292, PSYR2, 69500 Bron, France

INFO ARTICLE

Historique de l'article :

Reçu le 15 mars 2024

Accepté le 17 octobre 2024

Mots clés :

Design expérimental

Enactivisme

Perception directe

Validité écologique

RÉSUMÉ

Contexte. – La validité écologique des observations issues de l'étude clinique et expérimentale est devenue un paramètre central des recherches en neurosciences cognitives. Cependant, ce concept inscrit dans une perspective théorique spécifique de l'étude de la cognition et des comportements trouve sa définition et son utilisation contemporaine réduite au critère de validité externe d'une expérimentation en laboratoire ; c'est-à-dire son mimétisme supposé des conditions écologiques. Cette utilisation fautive du concept de validité écologique est une limitation théorique et méthodologique présente dans toutes les disciplines afférentes à l'étude de la cognition et des comportements.

Objectif. – Nous proposons d'explorer le concept de validité écologique pour les neurosciences cognitives et cliniques dans le sens initial du terme issu des théories fonctionnalistes, puis développé par les théories de la perception directe et de la cognition incarnée. L'objectif est de souligner les limitations des études expérimentales et cliniques à atteindre cette qualité dans leurs observations et résultats puis de proposer des solutions pour adapter les méthodologies expérimentales à l'étude écologique des comportements. Dans une première partie, nous décrirons l'origine des problèmes de validité écologique des sciences du comportement et de la cognition, issus de l'adaptation du design expérimental de Fisher pour la psychologie expérimentale. Ensuite nous aborderons l'importance fondamentale du concept de validité écologique dans les neurosciences et la recherche en santé mentale.

Discussion. – Enfin, nous discuterons des solutions possibles en neurosciences cognitives et cliniques pour améliorer la validité écologique et permettre une meilleure transférabilité des résultats expérimentaux aux multiples situations du quotidien.

© 2024 L'Auteur. Publié par Elsevier Masson SAS. Cet article est publié en Open Access sous licence CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

ABSTRACT

Context. – The ecological validity of observations derived from clinical and experimental studies has become a central parameter in cognitive neuroscience research. However, this concept rooted in the ecological psychology theories, finds its contemporary definition and use reduced to the external validity criterion of laboratory experimentation. This misapplication of the concept of ecological validity, in which ecological conditions are assumed to be replicated, leads to theoretical ambiguity in all disciplines involved in the study of cognition and behavior.

Objective. – We propose to explore the concept of ecological validity for cognitive and clinical neuroscience in its original formulation derived from functionalist theories and further developed by theories of direct perception and theories of enaction. This highlights the limitations of experimental and clinical studies in achieving this quality in their observations and results. In the first part, we will

Keywords:

Ecological validity

Experimental design

Generalisation

Paradigm

* Correspondance.

Adresse e-mail : william.vallet@inserm.fr.

<https://doi.org/10.1016/j.amp.2024.10.007>

0003-4487/© 2024 L'Auteur. Publié par Elsevier Masson SAS. Cet article est publié en Open Access sous licence CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

describe the origins of contemporary problems of ecological validity in behavioral and cognitive sciences, stemming from the adaptation of Fisher's experimental design for experimental psychology. Then we will address the fundamental importance of the concept of ecological validity in neuroscience and mental health research.

Discussion. – Finally, we will discuss possible solutions in cognitive and clinical neuroscience to improve ecological validity and enable better transferability of experimental results to various everyday situations.

© 2024 The Author(s). Published by Elsevier Masson SAS. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Observer un organisme a pour objectif d'identifier des régularités et des règles dans son comportement permettant de formuler une prévision sur ce que nous pouvons attendre de lui dans une situation donnée.

Pour autant, malgré ces règles particulières tirées de l'observation, nous ne pouvons garantir leur caractère reproductible dans le temps. De la même façon, nous ne pouvons pas généraliser ou attribuer de façon systématique cette expérience ni aux autres organismes du même type, ni aux diverses situations dans lesquelles ils pourraient être amenés à évoluer. Par conséquent, les explications concernant les raisons qui guident le comportement de l'organisme sont limitées par les conditions spécifiques de l'observation, et échappent ainsi à toutes possibilités de constitution d'une loi ou d'une théorie qui régit le comportement de l'ensemble des organismes du même type.

1.1. De Wilhelm Wundt à Ronald Aylmer Fisher : avènement d'une psychologie expérimentale

L'évolution de la psychologie moderne (Fig. 1) à partir du XIX^e siècle est marquée par la nécessité d'un alignement sur les

sciences du vivant pour trouver précisément dans l'étude des comportements le prolongement des lois qui régissent les phénomènes naturels.

Ainsi, le psychologue se propose désormais d'étudier les comportements, au même titre que les phénomènes naturels, en utilisant les méthodes expérimentales issues de la physiologie et dont les principes énoncés par Claude Bernard (1813–1878) sont largement adoptés dans toutes les sciences du vivant. Cette nouvelle approche développée par Wilhelm Wundt (1832–1920), donne naissance, à partir de 1879, à la psychologie *expérimentale*. Bien que cette nouvelle approche repose principalement sur l'introspection, elle intègre déjà les éléments fondamentaux de la démarche expérimentale moderne et appliquée à l'étude comportementale des rapports quantitatifs issus d'observations répétées et produites sous des conditions contrôlées et standardisées [103,104]. En outre, les comportements ne sont plus simplement observés, mais sont provoqués par un dispositif expérimental manipulé par le psychologue [74].

Malgré des avancées majeures jusqu'au début du XX^e siècle, la psychologie expérimentale se heurte rapidement à une limite importante. Dans sa quête de lois générales, elle sous-estime largement la part des différences interindividuelles, les considérant *a priori* neutralisées par l'observation contrôlée et l'agrégation

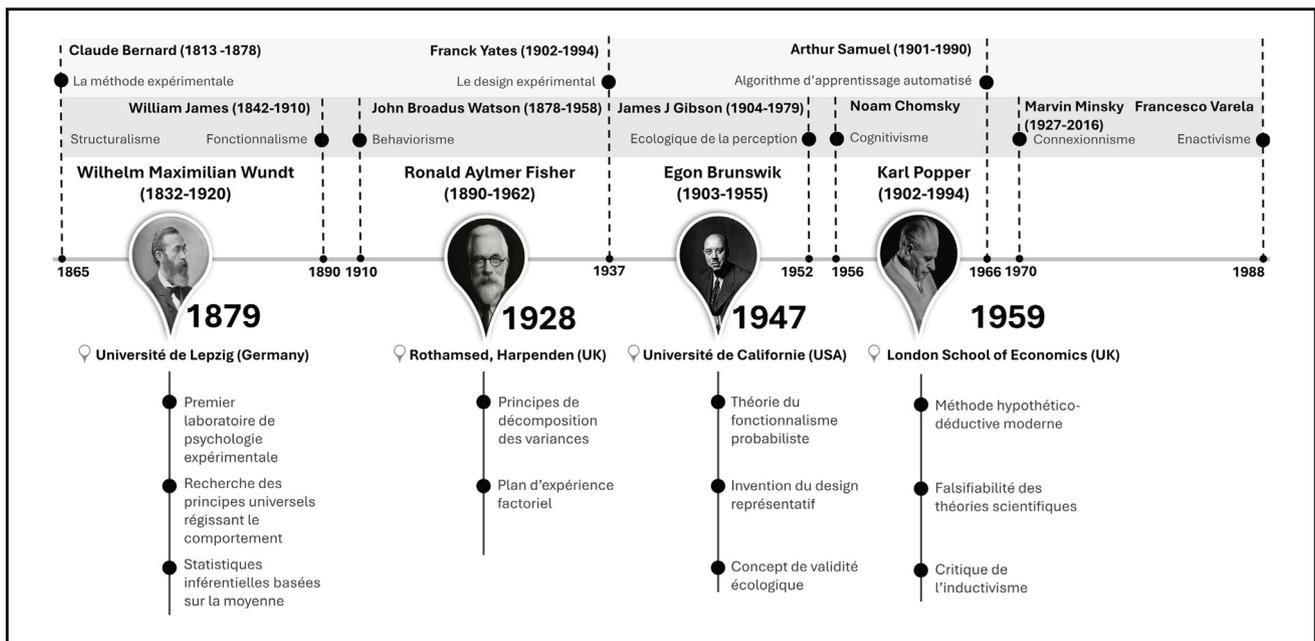


Fig. 1. Chronologie de l'évolution théorique et méthodologique de l'étude des comportements. Les principaux chercheurs et contributeurs de l'avancée théorique et méthodologique du domaine, sont associés chacun à une rupture épistémologique issue de leurs travaux.

des données individuelles en moyenne statistique. Cette moyenne statistique, obtenue sur un échantillon de sujets, est alors suffisante pour dégager une norme à partir de laquelle établir une loi générale. Il est à noter que les seuls outils d'inférence statistiques disponibles jusqu'en 1918, *test-t* de Student et *test-Z* basé sur la moyenne, étaient par leur absence d'alternative un mur méthodologique pour l'étude des variabilités interindividuelles [2]. Les procédures basées sur la moyenne statistique à partir d'un échantillon de sujets constituent également une limite épistémologique. Sur quelle base une moyenne qui neutralise les différences interindividuelles et qui n'existe pas à l'état de phénomène « écologique » induirait-elle une généralisation aux principes universels régissant le comportement animal ou humain ? Cette limite est déjà identifiée dans les premières décennies suivant l'établissement de la psychologie expérimentale ; Stanley Hall (1844–1924), disciple de Wundt, note déjà en 1899 que pour la psychologie expérimentale « la période des généralisations hâtives est passée » [40].

Dans les années 1920, l'introduction des principes de décomposition des variances par Ronald Aylmer Fisher (1890–1962) marque une première rupture pour la psychologie expérimentale. À partir de ses travaux en agronomie, Fisher développe l'analyse de variance dans le but initial d'accroître la validité statistique des observations [33,35]. Cette avancée statistique va trouver un écho particulier chez les psychologues. La méthode de Fisher appliquée à la psychologie expérimentale permet désormais d'établir une inférence statistique qui intègre la variabilité produite par les différents niveaux d'assignation de la variable indépendante, mais aussi la variabilité issue de l'échantillonnage ou « erreur expérimentale ». Le processus d'induction des résultats aux lois générales se trouve donc amélioré en considérant l'hétérogénéité des sujets sur lesquels les observations sont collectées [89].

Cependant, si les travaux de Fisher livrent aux psychologues un outil statistique clés en main, ils ne proposent pas de méthode

permettant une collecte des données adéquates pour la procédure d'analyse de variance. Au cours de la décennie suivante, Fisher va poser les bases du paradigme expérimental moderne pour la psychologie expérimentale en introduisant deux paramètres méthodologiques fondamentaux qu'il développe également pour l'agronomie [32,34]. Le premier paramètre concerne la constitution pré-expérimentale des groupes par assignation aléatoire des unités statistiques (les sujets intégrant l'expérimentation pour les études sur l'humain), alors que jusqu'ici prédomine l'équivalence des groupes par l'appariement (chaque sujet trouve son équivalent dans le groupe de comparaison). Le second paramètre est l'utilisation du principe de randomisation par carré latin introduit par Thorndike, McCall & Chapman (1916) [94], pour l'assignation aléatoire des différents niveaux de facteur aux unités statistiques. Par la suite, Franck Yates (1902–1994) perfectionne ces éléments méthodologiques pour les analyses multifactorielles dans son article « TC35 » pour *communication technique* N° 35 [105].

1.2. Un problème dans le design expérimental de Fisher et Yates pour les sciences du comportement

Depuis l'accomplissement des travaux de Fisher et Yates et jusqu'à son utilisation contemporaine, le paradigme expérimental pour l'étude des comportements ne connaît pas ou peu d'évolutions. Nous utilisons toujours le paradigme expérimental dans le but d'appliquer aux observations collectées une méthode statistique inférentielle dont l'objectif affiché est de généraliser les observations aux conditions de la vie quotidienne. Pourtant, dès les années 1940, Egon Brunswik est le premier à souligner l'adaptation fautive du paradigme expérimental (voir définition [Tableau 1](#)) de l'agronomie à la psychologie expérimentale [9].

Cette limite repose sur l'impossibilité de considérer comme équivalent le processus de généralisation tel qu'il est pensé dans l'agronomie expérimentale avec les conditions d'expérimentation

Tableau 1
Glossaire.

| Terme | Définition |
|---|---|
| <i>Théorie de la perception directe</i> | Approche déterministe de la perception issue des travaux de James Gibson. Selon cette théorie, l'organisme adapte ses comportements selon ses propres contraintes et selon les potentialités d'actions (indices distaux ou « affordances ») spécifiées par les invariants perceptifs disposés dans l'environnement (indices proximaux). |
| <i>Fonctionnalisme probabiliste</i> | Concept de l'adaptation des comportements aux caractéristiques probabilistes et multi-causales de l'environnement (Brunswik, 1955). Selon cette conception, l'organisme dispose d'informations proximales (sensoriellement accessibles) pour adapter son comportement aux états distaux de l'environnement (non sensoriellement accessibles). Les éléments proximaux et distaux entretenant des relations et des récurrences probabilistes, l'adaptation des comportements et des apprentissages repose alors sur la sélection d'indices qui permettent les meilleures prédictions. Pour survivre, un organisme doit donc choisir les indices proximaux disposant de la meilleure valeur adaptative donc les indices les plus valides. Par exemple, l'utilisation d'un indice proximal valide comme préalable à la consommation d'un aliment peut s'avérer pertinente pour le maintien en santé d'un organisme. |
| <i>Enactivisme</i> | Théorie des systèmes dynamiques de la cognition et de l'environnement introduite par Francesco Varela. Cette approche incarnée de la cognition propose que toutes compréhensions de la cognition et des comportements passent nécessairement par l'approche holistique d'un système complexe à plusieurs niveaux : « physiologiques–socioculturels–expérientiels–existentiels ». |
| <i>Validité écologique</i> | Mesure de liaison entre un indice proximal et un état distal de l'environnement. La validité écologique est établie lorsqu'un indice proximal entretient une forte valeur de prédiction sur un état distal ou une forte probabilité de co-occurrence. Par exemple, la présence d'empreintes dans le sol et la proximité immédiate d'un animal, ou encore l'utilisation des indices acoustiques pour prédire la trajectoire d'un stimulus en mouvement. |
| <i>Validité externe</i> | Évaluation qualitative du pouvoir de généralisation d'un effet expérimental aux populations et situations écologiques (Campbell, 1957). Ce critère se réduit généralement à la capacité d'un dispositif expérimental à simuler une situation in situ. Par exemple, un test qui utilise des stimuli dynamiques (vidéo ou <i>morphing</i>) pour évaluer la reconnaissance des émotions, présentera a priori une meilleure validité externe qu'un test utilisant des images statiques. |
| <i>Validité interne</i> | Évaluation qualitative d'un dispositif expérimental. L'évaluation repose sur l'identification des biais méthodologiques pouvant interférer dans la mesure d'un effet expérimental (Campbell, 1957). Par exemple, un échantillonnage non représentatif de la population ou la contribution de variables externes dans l'effet expérimental. |
| <i>Design représentatif</i> | Paradigme expérimental dont l'objectif est d'accroître le pouvoir de généralisation des effets expérimentaux aux multiples situations écologiques contraignant le comportement des organismes. Le principe est d'échantillonner les stimuli et les variables expérimentales pour être « représentatif » des situations écologiques, c'est-à-dire probabiliste et multi-causal (Brunswik, 1956). |
| <i>Design in Situ</i> | Combinaison du design expérimental et du design représentatif pour les expériences écologiques, dont l'objectif est de conserver un pouvoir de généralisation sans échantillonnage des stimuli et des variables. Le principe repose sur l'opérationnalisation et l'isolation d'une variable écologique, tout en conservant les contrôles nécessaires à l'étude expérimentale (Vallet & van Wassenhove, 2023). |

en psychologie expérimentale. Les deux situations et leurs correspondances avec les conditions écologiques divergent radicalement. En agronomie, les conditions expérimentales initiales reflètent fidèlement des conditions écologiques ; les parcelles d'expérimentations étant soumises aux mêmes conditions écologiques que le sont des parcelles de champs cultivées par un agriculteur lambda.

Dans une situation expérimentale, l'agronome applique un traitement sur les unités statistiques constituées par l'échantillon de parcelles. Il répète cette opération pour chaque parcelle, à laquelle il assigne de façon randomisée les différents traitements qui constituent sa variable indépendante. Par exemple, il peut constituer une variable « irrigation en litre par m² » et chaque parcelle reçoit de façon aléatoire un volume d'eau spécifique. Il mesure ensuite les productions de chaque parcelle et détermine par une statistique inférentielle quel volume d'eau est responsable du meilleur rendement. Ici le processus d'inférence statistique repose sur l'échantillon de parcelles irriguées et la généralisation des résultats est transparente, puisqu'il suffira à l'agriculteur de reproduire le protocole d'irrigation le plus favorable pour augmenter lui aussi ses rendements.

La situation est différente pour les conditions expérimentales en psychologie. En raison de leur caractère contrôlé et standardisé, elles n'entretiennent *a priori* aucune relation avec les conditions écologiques d'une situation de la vie quotidienne. Pour le psychologue, les parcelles sont remplacées par des sujets. Il procède au même titre que l'agronome, en leur assignant de façon aléatoire les différents niveaux de la variable indépendante et mesure ici, non plus des rendements, mais des comportements (i.e., des temps de réaction). Tout comme l'agronome, le psychologue collecte ensuite les résultats et applique une statistique inférentielle dans le but de généraliser ses résultats. Cependant, en aucun cas le processus d'induction statistique basé sur l'échantillon de sujets ne peut conduire à généraliser les résultats en direction des conditions écologiques, puisqu'aucune équivalence ne peut être établie entre une situation expérimentale standardisée et contrôlée et l'infinité des situations de la vie quotidienne susceptibles de produire un comportement du même type – un temps de réaction. Par cette procédure, le psychologue s'assure au maximum qu'un échantillon de sujets identique lui permettra de répliquer ses résultats sous les mêmes conditions expérimentales et suivant le niveau de validité interne de son expérimentation [7,31].

Cette limite fondamentale de la psychologie expérimentale, qui applique le processus d'inférence statistique à l'échantillon et non aux situations pour généraliser ses observations, est connue sous le nom de « double standard » [9]. Pour Brunswik, les sujets étant bien plus semblables entre eux que le sont les situations de la vie quotidienne, le psychologue doit s'employer à considérer davantage les situations que les sujets pour assurer une valeur de généralisation à ses résultats. De ce constat sont issus plusieurs courants de « psychologie écologique » dont le but est d'étudier la cognition et le comportement des organismes intégrés à leur environnement.

1.3. La psychologie écologique : du fonctionnalisme à l'enactivisme

Par la prégnance de l'environnement sur le comportement, les courants de la psychologie écologique sont à mettre en perspective des courants hérités du fonctionnalisme de William James (1842–1910), en réaction au structuralisme à l'origine de la psychologie expérimentale. Alors que le structuralisme recherche l'identification des « structures » constitutives de la cognition et leur articulation avec l'environnement pour adapter les comportements, le fonctionnalisme cherche, suivant une logique héritée de l'approche darwinienne, à comprendre comment l'environnement

structure la cognition et les comportements par une relation qui peut être de nature directe, probabiliste ou encore rétroactive.

Pour Brunswik et son fonctionnalisme probabiliste, cette compréhension n'est possible que dans la mesure où l'interaction entre l'organisme et l'environnement s'effectue sous des conditions écologiques qu'il définit comme probabilistes et multicausales. Selon cette théorie, pour prendre une décision et adapter son comportement aux différents états possibles de l'environnement, l'organisme n'a d'autres choix que d'utiliser des probabilités basées sur les éléments à sa disposition immédiate. Pour Brunswik, cette aptitude adaptative est forgée par le caractère multicausal et incertain de l'environnement dans lequel s'établissent des relations probabilistes entre les variables ou indices proximaux – directement perceptibles ou accessibles – et les éléments ou états distaux de l'environnement – non directement perceptibles, tels que le type d'action à entreprendre pour atteindre un objectif ou la définition d'une catégorie.

Cette distinction entre les indices proximaux et distaux est issue des travaux de Kurt Koffka (1886–1941) et des psychologues de la Gestalt [56]. Lorsqu'il s'agit d'évaluer un danger, un comportement adapté passe par une mesure de probabilité entre la perception d'indices proximaux dans l'environnement – par exemple la taille ou la forme d'une empreinte dans le sol – et les aspects distaux qui s'y réfèrent, comme le type ou la dangerosité de l'animal susceptible d'être rencontré. Le niveau d'adaptation d'un organisme est alors donné par la sélection des indices proximaux « écologiquement valides » lui permettant de faire les meilleures prédictions quant aux états à venir de son environnement et ainsi d'adapter ses comportements pour augmenter ses chances de survie ; dans la mesure où la validité des indices est corrélée à la valeur adaptative, un organisme utilisant les mauvais indices est davantage susceptible de produire des comportements non adaptés et donc de réduire ses chances de survie.

Avec la révolution informatique des années 1950, cette logique des théories fonctionnalistes dites externalistes (rejetant l'idée d'une cognition fonctionnant sur un mode *computo-symbolique* indépendante du corps et de l'environnement) va progressivement se voir remplacée par le néo-structuralisme, ou théorie internaliste des courants du cognitivisme puis du connexionnisme de Marvin Minsky (1927–2016). Ce dernier propose, sur la base d'une métaphore computationnelle issue des travaux de Shannon et Weaver, que les opérations mentales à la base des comportements puissent s'expliquer selon une manipulation de représentations symboliques internes ; ces manipulations s'effectuant suivant un ensemble de règles qu'il convient alors d'expliquer par l'expérimentation. Cependant un champ théorique externaliste va perdurer dans la lignée des travaux de Brunswik.

Ce champ est celui de la psychologie écologique ou de la perception directe de James Gibson [38] qui va reprendre et développer le concept de validité écologique de Brunswik dans le contexte de la perception visuelle [85,99]. La différence repose sur une divergence fondamentale entre une adaptation des comportements basés sur une inférence probabiliste (i.e., le fonctionnalisme probabiliste) et une approche déterministe (i.e., la perception directe). Pour Gibson, l'adaptation des comportements (ou l'action) repose sur un processus perceptif conditionné par un système organisme-environnement. L'organisme plongé dans son environnement traite un flux d'informations en continu à partir duquel il extrait des invariants. À partir de cette perception, l'organisme adapte ses comportements selon ses propres contraintes et selon les potentialités d'actions (indices distaux ou « affordances ») spécifiées par les invariants (indices proximaux). Ces comportements entraînent ensuite de nouvelles perceptions et donc de nouvelles possibilités d'actions ; la perception est en ceci insécable de l'action. Des exemples de cette insécabilité entre action et perception sont donnés par les expériences dites du « toucher

dynamique » qui montre que la manipulation d'objets (donc l'action ou le comportement) peut rendre accessibles les propriétés physiques de ces objets sans passer par la modalité tactilo-kinesthésique ou visuelle [67,78]. Dans cette théorie gibsonienne de la perception directe, la psychologie écologique est donc à penser comme l'étude de l'adaptation d'un organisme à son environnement perceptif. Ici la validité écologique des indices proximaux (les invariants) permet à l'organisme une prédiction sur les conséquences d'une action ou d'un comportement, c'est-à-dire la spécification d'une affordance par un cas particulier d'invariant perceptif [55,99] – par exemple, l'invariant perceptif de couleur d'un fruit mûr dans un arbre donne à l'animal une potentialité de collecte et d'alimentation.

Dans les dernières décennies, la théorie des systèmes dynamiques « cognition-expérience-environnement » a connu des développements importants. Ces théories s'enracinent dans les travaux de Brunswik et de Gibson, avec différents courants dits de « cognition incarnée » comme : la cognition ancrée [3], la théorie du cerveau écologique [36], l'enactivisme [98] ou encore la cognition des 4E pour Embodied (incarnée), Embedded (embarquée), Enacted (énectée), Extended (étendue) [76]. Le postulat principal de ces courants des systèmes dynamiques, que nous résumons ici par le terme générique de « écologique-enactive », repose sur une conception de l'interdépendance entre la cognition et l'activité exploratoire de l'organisme dans son environnement. Dans cette optique, les structures cognitives sont le résultat des interactions répétées entre un organisme et son environnement, c'est-à-dire son expérience au niveau individuel mais aussi au niveau de l'espèce [98]. À la différence de la théorie de la perception directe, les théories écologiques-enactivistes ne sont pas restreintes aux systèmes de la perception mais élargissent leur application à la cognition dans son ensemble. En outre, les actions et comportements ne sont plus simplement conditionnés par les invariants perceptifs et les contraintes internes de l'organisme. Ils sont ici davantage le résultat d'une rétroaction entre les actions modifiant l'environnement qui en retour conditionne les perceptions, les prises de décisions et les comportements futurs de l'organisme. L'enactivisme se distingue également des théories purement internalistes dans sa formulation des expériences perceptives qu'elle ne réduit pas à de simples représentations internes en réponses des entrées sensorielles. Elle souligne davantage le lien entre l'entrée sensorielle et le savoir sensorimoteur de l'organisme qui organise la perception. Lorsqu'un organisme perçoit visuellement un objet tridimensionnel, l'information présente sur la rétine est le résultat des photons qui se réfléchissent sur la surface visible de l'objet et forme une information bidimensionnelle sur la rétine. L'organisme en a pourtant l'expérience du volume et de la profondeur. Pour l'enactivisme, c'est donc l'expérience et le savoir sensorimoteur qui complète l'entrée sensorielle pour former le percept sans passer par des représentations computo-symboliques. Au travers de ces théories, il apparaît que l'environnement, qu'il soit déterministe, probabiliste ou en interaction avec un organisme, reste une composante déterminante pour prétendre à toutes les études écologiques de la cognition et des comportements.

1.4. La proposition méthodologique de Brunswik : validité écologique et design représentatif

Pour contourner le paradoxe du double standard et prétendre à une généralisation des résultats expérimentaux aux situations écologiques, Brunswik développe deux concepts centraux : le « design représentatif » et la « validité écologique » (Brunswik, 1947). Pour définir ces concepts, il faut rappeler que l'approche de Brunswik est centrée sur un fonctionnalisme probabiliste.

Les concepts de design représentatif et de validité écologique émergent directement de cette conception des comportements.

Pour conserver le caractère probabiliste de l'environnement dans l'expérience, Brunswik propose que le design expérimental échantillonne ses indices et situations, de façon à conserver une distribution et une covariance « représentatives » des conditions écologiques [10], dont la « validité écologique » est une mesure directe de corrélations entre la variable proximale et l'état distal de l'environnement [11] et la psychologie écologique l'étude de cette relation.

La validité écologique conceptualisée par Brunswik n'est donc pas réductible au critère qualitatif de validité externe [14,66], qui interroge la capacité d'un dispositif expérimental à simuler une situation écologique.

Le choix d'un dispositif expérimental qualifié de « naturalistique », en référence à son mimétisme supposé aux conditions écologiques, peut présenter un caractère plus ou moins important de validité externe, mais n'informe en rien sur la valeur écologique de ses observations. L'utilisation fautive du terme de validité écologique, en plus de contrevenir à la pensée Brunswik et des théories de la psychologie écologique, est une source de confusion théorique qui diffuse un biais conceptuel dans toutes les disciplines afférentes à l'étude des comportements [48,53,91].

Malgré son importance théorique, le design représentatif présente une limite significative dans l'étude expérimentale des comportements. Dans une situation écologique, si deux indices partagent une cooccurrence, le design représentatif, par principe méthodologique, doit maintenir cette relation, ce qui exclut toute possibilité d'étude indépendante de leur effet sur le comportement [68]. Cette limite constitutive du design représentatif contrevient à la démarche hypothético-déductive des sciences modernes [73], pour lesquelles le principe de cause à effet reste un élément déterminant dans l'interprétation et la structuration des résultats [5].

2. Quelles solutions pour les neurosciences cognitives et cliniques ?

2.1. Les études du comportement en condition écologique

Le problème de généralisation des observations expérimentales aux situations écologiques est d'autant plus problématique pour les neurosciences cognitives que leur objectif initial est de comprendre les comportements et d'établir des liens de causalités entre ces comportements et l'activité cérébrale. Dans le pire des cas, une expérience sans validité externe supposée peut établir chez un organisme des liens causaux entre un comportement non prototypique et des activités cérébrales, sans même pouvoir supposer que ces activités existent chez ce même organisme en conditions écologiques. Dans le meilleur des cas, une expérience avec un haut niveau de validité externe ne peut que supposer établir des liens causaux entre le comportement prototypique d'un organisme et des circuits ou des mécanismes cérébraux réellement impliqués dans l'activité naturelle de cet organisme [39,59]. Pour autant, le problème de généralisation des résultats aux situations écologiques demeure, et ce problème est particulièrement identifié dans l'exploration des données électrophysiologiques ; par exemple, les situations écologiques sont connues pour provoquer des activations cérébrales plus homogènes et distribuées spatialement sur des régions cérébrales qui ne présentent aucune modulation dans les expériences en laboratoire [28,23,43].

Pour dépasser cette limite et tenter de généraliser leurs observations, les neurosciences cognitives ont développé plusieurs approches. La première consiste en l'expérimentation sous conditions écologiques. Dans ce cadre, le sujet est placé dans une situation écologique en dehors du laboratoire et produit des comportements pendant un enregistrement de ses constantes

physiologiques ou électroencéphalographiques (EEG). Le développement et la miniaturisation des outils d'imagerie mobile (mEEG) marquent une rupture technologique qui permet depuis quelques années le développement de ce type d'expérimentation « écologique ». Une grande diversité de processus cérébraux comme l'attention [61], la mémoire [79] ou la cognition spatiale [26] peut être explorée en combinant comportement et enregistrement mEEG. L'intérêt de ces expérimentations réside dans le fait que le contexte d'expérimentation offre des possibilités d'une étude du comportement écologiquement valide. Cependant, cette qualité du contexte d'expérimentation n'est pertinente que si les comportements du sujet en expérimentation sont influencés par une variable indépendante écologique, c'est-à-dire composée par des indices appartenant aux contextes d'expérimentation eux-mêmes. Sur cet élément, deux types d'utilisation du contexte écologique en expérimentation peuvent être distingués.

D'une part, ces expériences utilisent le contexte écologique comme une variable de contraste avec l'expérimentation en laboratoire. Le sujet est placé alternativement en situation écologique ou de laboratoire et doit réaliser une tâche non liée au contexte [27]. Dans cette configuration, l'apport de la situation écologique en termes de généralisation des résultats est minime. Pour améliorer son pouvoir de généralisation, l'expérimentation peut contraster différents contextes écologiques, ce qui correspond à un micro-échantillonnage des situations et donc à une situation pouvant s'apparenter, en partie, au design représentatif de Brunswik. Pour autant, le pouvoir de généralisation reste faiblement amélioré car les indices permettant de réaliser la tâche sont toujours décorrélés de la situation écologique et donc dépourvus de validité écologique. Par exemple, pour réaliser une tâche de Oddball en condition écologique, dont la consigne est de détecter des stimuli déviants délivrés par un casque audio [47,60,90,107], le sujet n'a pas besoin d'utiliser les indices présents dans le contexte écologique.

Certaines de ces études établissent directement un lien entre le contexte et les tâches. Le développement de l'expérimentation en ligne présente, sous certains aspects, cette qualité de mise en correspondance entre le contexte et les tâches réalisées par les sujets. Un exemple récent de ce développement des tâches en ligne avec contexte est donné par l'étude de Chaumon et al. (2022) [17] des effets de l'isolement social sur la cognition tout au long de la pandémie de Covid-19. Dans cette étude, les auteurs se sont employés à explorer la perception du temps via des évaluations et des tests quotidiens, pendant les périodes de confinement et de déconfinement.

Une seconde partie de ces études se concentre sur l'exploration d'un comportement dans un contexte écologique *ad hoc*, c'est-à-dire une situation écologique correspondant aux comportements testés. Bien que peu nombreuses, ces études revêtent un intérêt particulier puisque l'étude du comportement en relation avec une variable écologique composée d'indices présents dans la situation confère une validité écologique aux observations. Un exemple de l'ingéniosité de ces études est donnée par Lee et al. (1984) [63] dans une expérience en situation *ad hoc* sur le franchissement des chaussées par les enfants. Pour tester leur hypothèse selon laquelle les enfants auraient une mauvaise perception des intervalles entre les véhicules en mouvement, les chercheurs mettent en place un dispositif expérimental qui devait évidemment garantir l'intégrité physique des participants. Une rue test est donc créée adjacente à la véritable chaussée où circulent des voitures. Ils demandent ensuite aux sujets de traverser la rue – test uniquement s'ils estiment pouvoir traverser ensuite la chaussée de circulation. La décision se base donc sur une variable indépendante écologique issue d'une situation *ad hoc* – les indices proximaux donnés par la vitesse des voitures en condition réelle de circulation – permettant de prédire un état distal de la situation – un écart suffisant entre

deux véhicules pour traverser. Sur la base de cette expérience, les résultats mettent en évidence la tendance des enfants, comparativement aux adultes, à traverser la rue test alors qu'ils n'ont pas le temps pour traverser la chaussée de circulation.

Malgré l'intérêt de ces études qui mettent en relation des comportements avec des indices écologiquement valides [1,102], le manque de contrôles sur les situations écologiques peut conduire les observations hors des limites formelles définies par le cadre expérimental. La propriété fondamentale des conditions écologiques est de conserver la multicausalité des sources d'effets et des relations probabilistes entre les indices utilisés par l'organisme. En l'absence de contrôle sur la situation, il est impossible de déterminer l'origine exacte des effets observés. De plus, l'absence d'opérationnalisation de la variable indépendante constituée par les indices écologiques est aussi une limitation. Par exemple, dans l'étude de Lee et al. (1984), la vitesse des voitures n'est pas contrôlée ni modulée de façon expérimentale. Par conséquent et au même titre qu'une étude de laboratoire, l'absence de contrôle permettant d'isoler la source d'effet et l'absence d'opérationnalisation de la variable indépendante ne permet pas d'assumer les critères scientifiques standards de reproductibilité, de mesurabilité et de réfutabilité. Cette dualité de l'expérimentation, entre une situation de laboratoire contrôlée et standardisée mais sans réelle valeur écologique et une situation écologique sans assurance des critères de scientificité, est connue sous le nom de dilemme du laboratoire [41].

Dans une étude récente, nous proposons comme solution au dilemme du laboratoire, une adaptation du design expérimental aux conditions écologiques, permettant l'étude des comportements en relation directe avec des indices écologiques. Ce design permet de réaliser des observations écologiques tout en conservant des contrôles sur les sources d'effets et une opérationnalisation de la variable écologique. Nous livrons dans cette étude un exemple de ce design « *in situ* », où le comportement de perception des temps-de-contact est directement influencé par des indices écologiquement valides issus d'un flux visuel contrôlé et généré par le déplacement dans un train à grande vitesse [97].

2.2. Validité écologique des observations issues des tests et des échelles cliniques

Dans l'application clinique, les tests, échelles ou questionnaires normés et standardisés sont largement utilisés pour évaluer des opérations cognitives non observables mais déduites de l'analyse ; par exemple, retenir une série de nombres dans un test d'empan. Ces opérations, supportées par des *construits* cognitifs comme la mémoire de travail, permettent la *fonction*, c'est-à-dire le comportement directement observable ou mesuré – comme le rappel des nombres. Dans ce contexte, la validité externe et la généralisation des observations reposent sur la question de savoir en quoi l'évaluation d'opérations constitutives d'un construit cognitif, mesuré par une réponse, peut informer sur une fonction similaire en situations écologiques. Le problème réside dans le fait que la plupart des questionnaires et échelles cliniques se concentrent sur la mesure du concept cognitif plutôt que sur la fonction, ce qui compromet la généralisation des résultats [80], car si un comportement peut être dans une certaine mesure généralisé (par exemple un comportement de planification peut s'étendre à diverses situations de la vie quotidienne), il n'est jamais certain de vérifier l'implication exacte d'une ou des fonctions dans le comportement étudié.

Un exemple de cette limitation est le *Wisconsin Card Sort Test* (WCST) dont la forme actuelle [44] est utilisée en clinique pour évaluer l'intégrité des zones préfrontales. Cette utilisation provient des observations réalisées chez différents patients cérébrolésés qui montrent l'implication des zones préfrontales dorsolatérales dans

la performance au test ; le WCST semblant discriminer les patients avec lésions préfrontales dorsolatérales des patients avec lésions orbitofrontales ou non frontales [72]. Cependant, les études en neuro-imagerie ne rapportent pas de résultats congruents avec l'observation clinique, la réalisation du WCST activant à la fois les régions cérébrales frontales et non frontales comme les régions pariétales [22,65,69,77]. Il est donc plausible que la fonction appelée par le triage de cartes selon des règles aléatoires entraîne le dépassement de la simple implication du construit de mémoire de travail et de ses opérations de flexibilité mentale. Sur ce constat, il devient impossible de prétendre généraliser ces observations aux situations du quotidien faisant appel aux mêmes opérations cognitives puisque ces opérations sont elles-mêmes non clairement identifiées par le test qui est censé les évaluer. En d'autres termes, le clinicien, faute de connaissances précises sur les implications cognitives exactes de la WCST, n'est pas en mesure d'inférer quelles situations de la vie quotidienne nécessitent les mêmes construits et opérations que ceux mesurés dans le WCST.

Les exemples illustrant ce problème de transférabilité des résultats psychométriques aux situations écologiques sont nombreux ; parmi eux, le test de Stroop et la tour de Londres sont les plus connus [12]. Le problème repose toujours sur l'impossibilité d'inférer les implications du construit cognitif étudié pour une fonction particulière, aux situations quotidiennes auxquelles un patient peut être confronté. Un autre exemple est donné par la Balloon Analogue Risk Task (BART) [64]. Dans cette tâche, le sujet est invité à gonfler un ballon virtuel dont la grosseur est corrélée au montant d'un gain monétaire. Cependant si le sujet gonfle trop le ballon et provoque son explosion, l'intégralité des gains est perdue. La BART est un test standardisé ciblant le construit cognitif de l'impulsivité et est utilisé comme mesure d'une fonction liée à la prise de risques sous conditions incertaines. Il peut être utilisé en clinique pour évaluer les patients souffrant de trouble de la personnalité [49,50], de troubles de consommations des substances [15,42] ou de dépression [45]. Pourtant, ses faibles qualités psychométriques de test re-test et de convergence avec d'autres mesures du construit de l'impulsivité, questionnent aussi bien sur son utilité clinique que sur la transférabilité de ses observations aux conditions écologiques. De plus, la conception de la tâche impliquant une probabilité d'explosion décorrélée de la taille du ballon semble induire un biais dans la formation des attentes chez les patients en vue de leur expérience préalable mais aussi par rapport aux conditions écologiques ; le fait que l'adaptation du comportement dans la tâche ne puisse s'établir sur la relation des indices proximaux et distaux – impossibilité d'établir une relation probabiliste entre l'indice proximal visuel (la taille du ballon) et l'état distal de l'environnement (l'explosion du ballon) – est contraire au fonctionnalisme probabiliste et réduit toutes possibilités de généralisation aux situations de la vie quotidienne [93].

Plusieurs solutions sont envisagées pour améliorer la validité écologique des questionnaires et des échelles cliniques. Une approche consiste à développer des outils axés sur la fonction plutôt que sur le seul construit cognitif, ce qui pourrait renforcer le pouvoir de généralisation [12]. Une autre solution adoptée est l'évaluation écologique momentanée (EMA) [92] dont l'objectif est d'accroître la validité écologique et de réduire le biais rétrospectif des questionnaires. Cette méthode propose pour l'évaluation standardisée une adaptation du concept d'échantillonnage des situations. Le patient est invité, par l'intermédiaire d'un téléphone mobile ou d'une tablette, à répondre à des questionnaires ou échelles en condition écologique de façon aléatoire au cours du temps. Bien que la conception théorique de l'EMA suppose que la représentativité des situations écologiques est suffisante pour atteindre un degré de validité écologique, cela entre en contradiction avec le corpus théorique développé par Brunswik (voir

Section 1.3). En outre, les conditions mêmes de la passation d'une échelle pour évaluer un construit cognitif peuvent difficilement être mises en perspective des théories de la psychologie écologique. Que ce soient les invariants perceptifs, les relations probabilistes entre indices proximaux et distaux ou encore les relations dynamiques organisme-environnement, aucun de ces prérequis ne semble s'intégrer aux paradigmes de l'EMA.

Cependant, la validité écologique pour les questionnaires et échelles cliniques reste une question importante, mais l'application de ce concept aux observations issues de questionnaires n'est pas clairement formulée dans la littérature. Une transposition de ce concept entre la psychologie expérimentale et les questionnaires cliniques semble invalide. Dans une auto-évaluation par questionnaire, l'invariant perceptif ou l'indice proximal peut davantage correspondre à l'état interne du sujet lui permettant de prédire sa situation ou son état interne distal. Replacé dans le contexte fonctionnaliste et probabiliste, l'adaptation du comportement repose alors sur la validité de l'indice qui est donnée par la qualité de la perception des états internes du patient. Un indice valide permet la prédiction la plus juste sur la situation distale et donc une modulation adaptée du comportement. Par exemple, dans une étude EMA sur les troubles de l'alimentation chez les patients souffrant d'anorexie mentale [62], il est observé que l'état interne du patient le conduisant à se peser de façon répétitive – indice proximal – entraîne une plus grande restriction alimentaire et donc une perte de poids dans les jours suivants – état distal. Ici, la validité de l'indice proximal est altérée par la dysmorphophobie, empêchant le patient d'adapter son comportement alimentaire pour atteindre un meilleur état distal de sa situation, c'est-à-dire une prise de poids. Une illustration similaire peut être donnée dans les situations dites de « craving » où le patient est en besoin et en recherche active de consommation. Ces études utilisant le paradigme de l'EMA décrivent comment l'état du patient peut prédire la prise de substance [13,20]. Par exemple, dans le cas d'un trouble de consommation des substances opioïdes, Ellis et al. (2022) décrivent comment l'humeur et la variabilité du craving – c'est-à-dire l'élément proximal interne du patient – peuvent prédire la prise de substance [29].

À partir de cet exemple, il est donc possible de penser la validité écologique des questionnaires comme la pertinence de l'évaluation d'un indice proximal permettant de prédire un état distal. L'étude de cet indice et sa relation avec les états distaux sont d'autant plus intéressantes si cette dernière dispose d'un intérêt clinique comme l'évolution du poids des patients souffrant d'anorexie mentale.

3. L'approche écologique en santé mentale

Comme pour les questionnaires cliniques, le concept de validité écologique semble également d'intérêt pour penser les problématiques de santé mentale. Pour rappel, ce concept s'inscrit dans un cadre conceptuel plus large qui est celui des théories écologiques. Ce cadre propose que les organismes évoluent et agissent dans des environnements dont les éléments qui y sont contenus sont à disposition de l'organisme pour adapter son comportement ; les relations liant ces éléments à l'organisme pouvant être directes, probabilistes ou encore rétroactives (cf. Section 1.3).

Dans le cadre de la perception directe de Gibson, le fonctionnement pathologique ne peut être pensé que dans une perspective sensorimotrice, dans la mesure où le comportement est directement contraint par la perception des potentialités d'actions qui lui sont offertes. En cela, un défaut d'ordre sensorimoteur chez un organisme serait en mesure d'expliquer l'inadaptation chronique de ses comportements. À ce titre, la

perception étant étroitement liée à l'action, Gibson considère que les phénomènes d'hallucinations rencontrés dans certaines pathologies mentales comme la schizophrénie ne peuvent être considérés comme des expériences perceptives. Gibson illustre ce propos par le fait qu'il est possible de mettre à l'épreuve l'endurance des perceptions par l'action des récepteurs sensoriels (avec une inspection visuelle, mouvements de la tête, des mains et du corps) mais que les images mentales ne sont pas en mesure d'y parvenir. La perception est effective uniquement dans une situation où l'activité des récepteurs sensoriels est corollaire d'un changement de stimulation, ce qui implique une source externe de stimulation (si les mouvements de la tête influent sur la source de stimulation visuelle, c'est que le sujet perçoit). Inversement, si l'activité des récepteurs n'entraîne pas de fluctuation de la stimulation, c'est qu'il n'y a pas de source externe de stimulation et donc pas de perception. En d'autres termes, si nos actions et l'activité des récepteurs sensoriels qui en résulte n'ont pas d'effet sur la stimulation, c'est que la source d'information est à l'intérieur du système. Dans le cadre des pathologies telles que la schizophrénie, Gibson est en quelque sorte précurseur des courants « Top-down » par l'implication des images mentales dans la génération des hallucinations sensorielles [51].

Des implications différentes peuvent être vues dans l'approche probabiliste. Ici, les expositions répétées à des environnements délétères sont un facteur possible du développement et du maintien des pathologies mentales. Les sujets évoluant dans un monde intrinsèquement incertain n'ont d'autre choix pour s'y adapter que d'appliquer des lectures probabilistes entre les éléments à leur disposition immédiate (proximal) et les comportements à mettre en place pour atteindre ou prédire un état subséquent de cet environnement (distal). Une exposition répétée à un environnement spécifique entraînera donc un comportement singulier, guidé par une forte relation probabiliste (validité écologique) entre un état proximal et un état distal de cet environnement. En santé mentale, les expositions répétées à des environnements délétères, qu'ils soient de nature sociale [71] ou toxicologique [46], sont identifiées comme des facteurs importants dans le développement et le maintien des pathologies mentales. À titre de comparaison, une exposition répétée à certains risques sociaux-environnementaux entraîne une augmentation majeure des événements de décompensation psychotique, comparativement aux risques génétiques [95].

Enfin, une approche plus holistique en santé mentale peut être donnée par l'application de la théorie enactive en psychiatrie [37]. Dans la perspective enactiviste, l'adaptation des comportements repose sur l'interaction entre l'organisme et son environnement. En cela, comprendre l'organisme requiert des aspects physiologiques ou sensorimoteurs qui lient le corps à la cognition, son milieu socioculturel, les récurrences d'interaction qu'il entretient avec l'environnement, c'est-à-dire son expérience physique mais aussi existentielle [25]. L'approche de l'organisme doit donc être envisagée comme un système comprenant des aspects physiologiques, socioculturels, expérimentiels et existentiels. Le trouble en santé mentale doit être compris comme une perturbation de l'ensemble du système, entraînant une adaptation atypique de l'organisme à son environnement et donc une modification de ses expériences. L'organisation du système étant considérée comme horizontale, aucun des aspects de celui-ci ne peut être tenu comme une cause sous-jacente des troubles de santé mentale. Selon la théorie des systèmes complexes, la cause du trouble est à chercher dans l'interaction des différentes dimensions du système. Pour le clinicien, il revient alors de considérer le trouble comme la résultante d'une dérégulation d'un système complexe, lui permettant de multiplier les pistes possibles d'intervention médicamenteuse ou psychothérapeutique.

4. Les nouvelles méthodes d'explorations du comportement

4.1. La Réalité virtuelle

La réalité virtuelle (VR) émerge dans le domaine des neurosciences cognitives comme le médiateur entre les études contrôlées du comportement en laboratoire, scientifiquement valides mais peu généralisables, et les études ou observations écologiques, peu répliquables mais écologiquement valides. La VR représente ainsi un outil potentiel qui permet d'accroître la validité écologique et la généralisation des résultats, tout en conservant les contrôles nécessaires à l'étude scientifique. Le nombre croissant d'études combinant la VR et des outils d'imagerie est un indicateur de son développement dans toutes les composantes des neurosciences cognitives [19]. Au-delà de ses aspects techniques, qui influencent la capacité d'immersion et de simulation des environnements virtuels (EVs), la VR doit également s'assurer que ces derniers sont des simulations écologiquement valides des situations écologiques. En d'autres termes, sans une évaluation préalable de la validité écologique des EVs, le psychologue utilisant un dispositif de VR n'est pas en mesure de savoir si les réponses observées sont équivalentes à celles observées dans des situations comparables du monde réel [57]. Il existe donc un paradoxe entre l'utilisation de la VR comme substitut au monde réel et la nécessité préalable de connaître les indices utilisés par l'organisme pour adapter son comportement en conditions écologiques. Sans cette connaissance, la VR ne peut pas garantir la validité écologique de ses EVs. Un exemple est donné par Krakauer et al. (2017) à partir d'une étude sur le poisson zèbre [6]. Dans cette étude, un système de RV est développé pour susciter de manière fiable un comportement de prédation chez les larves de poisson-zèbre chassant les paramécies. Pour s'assurer que ce comportement est bien identique au comportement écologique, il est essentiel de trouver un marqueur comportemental dans la situation écologique déclenchée par les indices proximaux – les paramécies. L'observation en situation écologique révèle que la détection de la proie se manifeste par un comportement spécifique de vergence binoculaire. Sur cette base, il devient possible d'évaluer la validité d'un EV chez les poissons-zèbres en simulant un contexte de prédation sur les paramécies et en s'assurant de retrouver le même comportement de vergence binoculaire pendant la chasse. C'est à cette seule condition que la VR assure un gain de validité écologique dans ses observations. Dans un article récent, nous avons proposé le design *in situ* comme l'un des préalables possibles à la reproduction de situations en VR [97].

L'utilisation de la VR en contexte clinique est également envisagée pour accroître la validité écologique des batteries de questionnaires et d'échelles [4,58,80], ainsi que pour les évaluations et les traitements des personnes souffrant de pathologies psychiatriques [30]. Cependant, l'application de la VR dans ce contexte d'évaluation clinique se heurte à plusieurs limites. Comme nous l'avons préalablement mentionné pour l'EMA, la validité écologique n'est pas induite par la représentativité des situations. De plus, la VR doit s'assurer que ces situations sont déjà de bonnes simulations du monde réel. Enfin, au même titre que pour les questionnaires et échelles, le contexte d'évaluation et le questionnaire n'entretiennent que peu de relations au regard de la validité écologique. L'intérêt fondamental réside cependant dans la simplicité et la flexibilité des environnements qu'il est possible de créer pour évaluer et tester le patient. Cette caractéristique représente un avantage significatif dans des situations cliniques telles que les thérapies d'exposition. Des preuves de l'efficacité de la VR ont déjà été avancées dans le traitement des troubles du comportement alimentaire [21,24] et de nombreux travaux cliniques se développent pour cibler la psychose [88] et les troubles du spectre autistique [70].

4.2. L'apprentissage automatique

Pour les neurosciences cognitives, le concept d'*apprentissage automatique* ou de *machine learning*, introduit par Arthur Samuel (1901–1990) au début des années 1960, désigne la capacité d'un programme ou d'un algorithme à regrouper ou classifier les comportements ou activités cérébrales d'un organisme à partir d'un grand nombre de données collectées [100]. La caractéristique principale de ces algorithmes réside dans leur capacité d'apprentissage : un algorithme peut affiner ses réponses en fonction du volume et du type de données fournies par le programmeur. Pour formuler une réponse, l'algorithme peut se baser dans certains cas sur des règles relatives aux données que va lui fournir le programmeur. Dans d'autres cas, il peut établir ses propres règles à partir des données d'entrée. Enfin, l'algorithme peut également être évalué sur ses réponses par le programmeur lui-même, ce qui renforce ou invalide la pertinence de ses règles. Ces conditions offrent trois possibilités d'apprentissage : l'apprentissage supervisé, l'apprentissage non supervisé et l'apprentissage par renforcement [81].

Dans l'apprentissage supervisé, les modèles formés par l'algorithme sont de deux types : les modèles de classification, qui fournissent des réponses prédictives sur des catégories telles qu'un diagnostic ou une fonction cognitive, et les modèles de régression qui utilisent les relations entre les variables pour prédire une réponse continue, comme le score à un questionnaire ou une mesure de l'activité cérébrale. Dans l'apprentissage par renforcement, les modèles peuvent être soit de type classifieur soit de type régresseur, comme pour les modèles supervisés, à la différence qu'ils reçoivent un retour positif ou négatif en fonction de leur réponse. Ces deux types d'algorithmes trouvent une utilité particulière en situation clinique, que ce soit pour des essais thérapeutiques [86,106], des prédictions sur le développement de pathologies [96] ou encore des diagnostics [52].

Dans l'apprentissage non supervisé, les modèles de regroupement ou *clustering* permettent d'identifier des patrons communs au sein de larges ensembles de données. Il devient alors possible de distinguer dans une population donnée des sous-ensembles regroupés en fonction d'une activité ou d'une caractéristique commune [87]. Pour les neurosciences cliniques, les modèles de regroupement sont particulièrement intéressants pour l'approche dimensionnelle des pathologies en santé mentale. Par exemple, un tel modèle peut permettre de regrouper sur la base de leurs symptômes, des sous-types de patients provenant d'une population hétérogène mais souffrant d'une même pathologie [18,54,101]. Les réponses fournies par l'algorithme permettent ainsi une meilleure prise en compte des dimensions symptomatologiques dans la prise en charge du patient et dans l'établissement d'un diagnostic potentiel.

Dans le cadre des neurosciences cognitives, l'utilisation des algorithmes pour l'étude des comportements et des activités cérébrales constitue une approche qui diffère radicalement de la conception expérimentale initialement introduite par Wundt et de sa logique moderne issue de l'approche hypothético-déductive de Karl Popper (1902–1994) [84]. Sur le principe, l'approche par apprentissage automatisé se fonde sur une démarche inductive utilisant de vastes ensembles de données non contrôlées [8] qui permettent la formation de modèles hautement prédictifs sur les phénomènes écologiques [75]. Ces ensembles de données, collectés en dehors du cadre expérimental, préservent les caractéristiques de la validité écologique telles qu'énoncées par Brunswik – les relations probabilistes entre les états proximaux et distaux de l'environnement et le caractère multicausal des phénomènes. Par exemple, dans la conception d'un algorithme d'aide à la conduite pour assister les conducteurs de voitures dans l'évitement d'obstacles, il est possible de fournir à l'algorithme un

grand nombre de variables, comme la vitesse de l'automobile, les conditions météorologiques, la luminosité ou encore la distance et la vitesse des obstacles. De plus, des variables physiologiques relatives au conducteur, comme ses constantes cardiaques, son activité EEG et ses comportements oculomoteurs, peuvent également être fournies. Dans cet ensemble de données, il est certain qu'une forte corrélation peut être établie entre la probabilité d'impact et l'état de vigilance du conducteur. Les indices proximaux comme la vitesse du véhicule, la distance des obstacles et la vigilance du conducteur présentent donc une validité écologique évidente par rapport à l'état distal de l'environnement – impact ou non avec l'obstacle – ce qui conditionne le besoin d'une assistance à la manœuvre d'évitement. Ainsi, cet exemple illustre comment la validité écologique des indices utilisés ici par un algorithme permet bien la généralisation des modèles au-delà d'un simple échantillon de situations et de conducteurs, à condition bien sûr que les données sur lesquelles ils fondent ses prédictions soient elles-mêmes écologiques. Ces modèles pouvant être retrouvés dans la plupart des véhicules modernes, ils ne nécessitent donc pas une quelconque adaptation aux conducteurs et aux situations ; leur application est donc généralisable.

Pourtant, bien que l'algorithme puisse résoudre les problèmes de validité écologique par l'utilisation de vastes ensembles de données non contrôlées, cela se fait au détriment d'une approche causale des phénomènes étudiés. L'approche d'apprentissage automatisé est conduite par les données et privilégie une approche fondée sur la corrélation pour prévoir ou classifier un phénomène [82,83]. En revanche, dans le cadre expérimental classique, l'approche est traditionnellement hypothético-déductive, basée sur des hypothèses et visant une explication causale du phénomène. Cette divergence n'est pas sans conséquence sur la formation des connaissances à partir des modèles d'apprentissage. Une première limite réside dans l'absence de causalité. Par exemple, si un algorithme établit une corrélation entre l'activité d'une région cérébrale et la production d'un comportement spécifique, cela ne permet en aucun cas d'établir un lien de cause à effet entre la zone identifiée et le comportement produit. Dans le cas de l'algorithme d'assistance à la conduite, aucune information causale entre les variables d'entrées et le besoin d'assistance à la conduite ne pourrait être établi. La seconde limitation concerne l'explication du modèle. Lorsqu'un grand nombre de variables permet à l'algorithme de classifier ou de prédire avec succès un phénomène, les conditions de la classification peuvent échapper au raisonnement logique et à la formation d'une connaissance scientifique [16].

5. Conclusion

Dans cette revue de la littérature, nous avons entrepris de retracer l'évolution de l'étude des comportements et de la cognition afin de mettre en perspective les difficultés de généralisation des résultats avec les limites méthodologiques de la discipline. En outre, nous avons souligné l'adaptation fautive du concept de validité écologique, issu des théories de la psychologie écologique. Cette utilisation détournée conduit une grande majorité des études contemporaines à appuyer leur processus de généralisation sur un concept réduit à celui de validité externe qui ne peut supporter une telle assertion. Pour répondre à cela, nous avons proposé une mise en perspective de ce concept de validité écologique avec les théories qui l'ont forgé – du fonctionnalisme aux théories contemporaines des systèmes complexes comme l'enactivisme.

Il semble important de rétablir ce concept de validité écologique dans son sens originel et de l'ancre dans un terrain

théorique, c'est-à-dire en perspective des théories de la psychologie écologique. Cette condition semble essentielle pour que l'évolution des paradigmes et l'utilisation de nouvelles méthodologies puissent conduire les neurosciences cognitives à une meilleure généralisation de leurs observations et de leurs résultats.

Déclaration de liens d'intérêts

L'auteur déclare ne pas avoir de liens d'intérêts.

Remerciements

Je remercie le Dr Cécilia Neige pour ses corrections, ses suggestions et sa relecture approfondie du manuscrit. Je remercie également Nadine Barakat pour ses révisions de la version en anglais.

Références

- [1] Aspinnall P, Mavros P, Coyne R, Roe J. The urban brain: analysing outdoor physical activity with mobile EEG. *Br J Sports Med* 2015;49:272–6. <http://dx.doi.org/10.1136/bjsports-2012-091877>.
- [2] Audusseau J. Chapitre 4. L'expérimentation en psychologie. In: *L'expérimentation dans les Sci.*. Paris: Éditions Matériologiques; 2022. p. 65–85.
- [3] Barsalou LW. Grounded cognition. *Annu Rev Psychol* 2008;59:617–45. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093639>.
- [4] Bell IH, Nicholas J, Alvarez-Jimenez M, Thompson A, Valmaggia L. Virtual reality as a clinical tool in mental health research and practice. *Dialogues Clin Neurosci* 2020;22:169–77. <http://dx.doi.org/10.31887/DCNS.2020.22.2/valmaggia>.
- [5] Berkowitz L, Donnerstein E. External validity is more than skin deep: some answers to criticisms of laboratory experiments. *Am Psychol* 1982;37:245–57. <http://dx.doi.org/10.1037/0003-066X.37.3.245>.
- [6] Bianco IH, Kampff AR, Engert F, Stephan CF. Prey capture behavior evoked by simple visual stimuli in larval zebrafish. *PLoS One* 2011;6:e21111. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0021111>.
- [7] Bracht GH, Glass GV. The external validity of experiments. *Am Educ Res J* 1968;5:437–74. <http://dx.doi.org/10.3102/00028312005004437>.
- [8] Breiman L. Statistical modeling: the two cultures. *Stat Sci* 2001;16:199–231.
- [9] Brunswik E. Organismic achievement and environmental probability. *Psychol Rev* 1943;50:255.
- [10] Brunswik E. Representative design and probabilistic theory in a functional psychology. *Psychol Rev* 1955;62:193–217. <http://dx.doi.org/10.1037/h0047470>.
- [11] Brunswik E. *Perception and the representative design of psychological experiments*. Univ of California Press; 1956.
- [12] Burgess PW, Alderman N, Forbes C, Costello A, Coates LMA, Dawson DR, et al. The case for the development and use of "ecologically valid" measures of executive function in experimental and clinical neuropsychology. *J Int Neuropsychol Soc* 2006;12:194–209. <http://dx.doi.org/10.1017/S1355617706060310>.
- [13] Burgess-Hull AJ, Panlilio LV, Preston KL, Epstein DH. Trajectories of craving during medication-assisted treatment for opioid-use disorder: subtyping for early identification of higher risk. *Drug Alcohol Depend* 2022;233:109362. <http://dx.doi.org/10.1016/j.drugalcdep.2022.109362>.
- [14] Campbell DT. Factors relevant to the validity of experiments in social settings. *Psychol Bull* 1957;54:297–312. <http://dx.doi.org/10.1037/h0040950>.
- [15] Canning JR, Schallert MR, Larimer ME. A systematic review of the Balloon Analogue Risk Task (BART) in alcohol research. *Alcohol Alcohol* 2022;57:85–103. <http://dx.doi.org/10.1093/alcalc/agab004>.
- [16] Carlson T, Goddard E, Kaplan DM, Klein C, Ritchie JB. Ghosts in machine learning for cognitive neuroscience: moving from data to theory. *Neuroimage* 2018;180:88–100. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.08.019>.
- [17] Chaumon M, Rioux PA, Herbst SK, Spiouas I, Kübel SL, Gallego Hiroyasu EM, et al. The Blursday database as a resource to study subjective temporalities during COVID-19. *Nat Hum Behav* 2022;6:1587–99. <http://dx.doi.org/10.1038/s41562-022-01419-2>.
- [18] Chen J, Patil KR, Weis S, Sim K, Nickl-Jockschat T, Zhou J, et al. Neurobiological divergence of the positive and negative schizophrenia subtypes identified on a new factor structure of psychopathology using non-negative factorization: an international machine learning study. *Biol Psychiatry* 2020;87:282–93. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biopsych.2019.08.031>.
- [19] Choi JW, Kwon H, Choi J, Kaongoen N, Hwang C, Kim M, et al. Neural applications using immersive virtual reality: a review on EEG studies. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2023;31:1645–58. <http://dx.doi.org/10.1109/TNSRE.2023.3254551>.
- [20] Cleveland HH, Knapp KS, Brick TR, Russell MA, Gajos JM, Bunce SC. Effectiveness and utility of mobile device assessment of subjective craving during residential opioid dependence treatment. *Subst Use Misuse* 2021;56:1284–94. <http://dx.doi.org/10.1080/10826084.2021.1921808>.
- [21] Clus D, Larsen ME, Lemey C, Berrouguet S. The use of virtual reality in patients with eating disorders: systematic review. *J Med Internet Res* 2018;20:1–9. <http://dx.doi.org/10.2196/jmir.7898>.
- [22] Cona G, Wiener M, Scarpazza C. From ATOM to GradiATOM: cortical gradients support time and space processing as revealed by a meta-analysis of neuroimaging studies. *Neuroimage* 2021;224:117407. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117407>.
- [23] David SV, Vinje WE, Gallant JL. Natural stimulus statistics alter the receptive field structure of V1 neurons. *PLoS Biol* 2004;2:1991–2006. <http://dx.doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1422-04.2004>.
- [24] De Carvalho MR, De Santana Dias TR, Duchesne M, Nardi AE, Appolinario JC. Virtual reality as a promising strategy in the assessment and treatment of bulimia nervosa and binge eating disorder: a systematic review. *Behav Sci (Basel)* 2017;7. <http://dx.doi.org/10.3390/bs7030043>.
- [25] de Haan S. An enactive approach to psychiatry. *Philos Psychiatry Psychol* 2020;27:3–25. <http://dx.doi.org/10.1353/ppp.2020.0001>.
- [26] Delaux A, de Saint Aubert JB, Ramanoël S, Bécu M, Gehrke L, Klug M, et al. Mobile brain/body imaging of landmark-based navigation with high-density EEG. *Eur J Neurosci* 2021;54:8256–82. <http://dx.doi.org/10.1111/ejn.15190>.
- [27] Edwards DJ, Trujillo LT. An analysis of the external validity of eeg spectral power in an uncontrolled outdoor environment during default and complex neurocognitive states. *Brain Sci* 2021;11:1–26. <http://dx.doi.org/10.3390/brainsci11030330>.
- [28] Eisenberg I, Bissett PG, Zeynep Enkavi A, Li J, MacKinnon DP, Marsch LA, et al. Uncovering the structure of self-regulation through data-driven ontology discovery. *Nat Commun* 2019;10:2319. <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-019-10301-1>.
- [29] Ellis JD, Mun CJ, Epstein DH, Phillips KA, Finan PH, Preston KL. Intra-individual variability and stability of affect and craving among individuals receiving medication treatment for opioid use disorder. *Neuropsychopharmacology* 2022;47:1836–43. <http://dx.doi.org/10.1038/s41386-022-01352-y>.
- [30] Emmelkamp PMG, Meyerbröker K. Virtual reality therapy in mental health. *Annu Rev Clin Psychol* 2021;17:495–519. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-clinpsy-081219-115923>.
- [31] Findley MG, Kikuta K, Denly M. External Validity. *Annu Rev Polit Sci* 2021;24:365–93. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-polisci-041719-102556>.
- [32] Fisher RA. The arrangement of field experiments. *Journal of the Ministry of Agriculture* 1926;33:503–15. <http://dx.doi.org/10.232637/rothamsted.8y61g>.
- [33] Fisher RA. *Statistical methods for research workers*. Oliver and Boyd; 1928.
- [34] Fisher RA. Design of experiments. *Br Med J* 1936;1:554.
- [35] Fisher RA, Mackenzie WA. Studies in crop variation. II. The manual response of different potato varieties. *J Agric Sci* 1923;13:311–20.
- [36] Fuchs T. *Ecology of the brain: the phenomenology and biology of the embodied mind*. Oxford University Press; 2017.
- [37] Gauld C, Bottemanne H. Toward a computational enactive, extended, embedded, emotive, and embodied (5E) psychiatry. *Ann Med Psychol* 2022;180:383–91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.amp.2022.01.001>.
- [38] Gibson JJ. *The ecological approach to visual perception: classic edition*. Psychology press; 2014.
- [39] Gómez J, Marín-méndez JJ, Molero P, Atakan Z, Ortuño F. Time perception networks and cognition in schizophrenia: a review and a proposal. *Psychiatry Res* 2014;220:737–44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psychres.2014.07.048>.
- [40] Hall S. Editorial. *Pedagog Semin* 1899;6:265–6. <http://dx.doi.org/10.1080/08919402.1899.10532965>.
- [41] Hammond KR, Stewart TR. *The essential Brunswik: beginnings, explications, applications*. Oxford University Press; 2001.
- [42] Hanson KL, Thayer RE, Tapert SF. Adolescent marijuana users have elevated risk-taking on the balloon analog risk task. *J Psychopharmacol* 2014;28:1080–7. <http://dx.doi.org/10.1177/0269881114550352>.
- [43] Hasson U, Malach R, Heeger DJ. Reliability of cortical activity during natural stimulation. *PLoS Biol* 2011;9:1–17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pbs.2009.10.011>.
- [44] Heaton RK. In: *Wisconsin Card Sorting Test Manual*. Odessa, FL: Psychological Assessment Resources; 1981.
- [45] Hevey D, Thomas K, Laureano-Schelten S, Looney K, Booth R. Clinical depression and punishment sensitivity on the BART. *Front Psychol* 2017;8:1–7. <http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00670>.
- [46] Heyer DB, Meredith RM. Environmental toxicology: sensitive periods of development and neurodevelopmental disorders. *Neurotoxicology* 2017;58:23–41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuro.2016.10.017>.
- [47] Hölle D, Meekes J, Bleichner MG. Mobile ear-EEG to study auditory attention in everyday life: auditory attention in everyday life. *Behav Res Methods* 2021;53:2025–36. <http://dx.doi.org/10.3758/s13428-021-01538-0>.
- [48] Holleman GA, Hooge JTC, Kemner C, Hessels RS, Gregory NJ. The 'Real-World Approach' and its problems: a critique of the term ecological validity. *PLoS One* 2020;15:1–12. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0200721>.
- [49] Hunt MK, Hopko DR, Bare R, Lejuez CW, Robinson EV. Construct validity of the Balloon Analog Risk Task (BART): associations with psychopathy and impulsivity. *Assessment* 2005;12:416–28. <http://dx.doi.org/10.1177/1073191105278740>.
- [50] Hüpen P, Wagels L, Weidler C, Kable JW, Schneider F, Habel U. Altered psychophysiological correlates of risk-taking in borderline personality disorder. *Psychophysiology* 2020;57:1–12. <http://dx.doi.org/10.1111/psyp.13540>.

- [51] Iii ARP, Kelley M, Corlett PR. Review hallucinations as top-down effects on perception. *Biol Psychiatry Cogn Neurosci Neuroimaging* 2016;1:393–400. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bpsc.2016.04.003>.
- [52] Kaur P, Sharma M. Diagnosis of human psychological disorders using supervised learning and nature-inspired computing techniques: a meta-analysis. *J Med Syst* 2019;43. <http://dx.doi.org/10.1007/s10916-019-1341-2>.
- [53] Kihlstrom JF. Ecological validity and “Ecological Validity”; 2021. <http://dx.doi.org/10.1177/1745691620966791>.
- [54] Kircher T, Wöhr M, Nenadic I, Schwarting R, Schrott G, Alferink J, et al. Neurobiology of the major psychoses: a translational perspective on brain structure and function—the FOR2107 consortium. *Eur Arch Psychiatry Clin Neurosci* 2019;269:949–62. <http://dx.doi.org/10.1007/s00406-018-0943-x>.
- [55] Kirlik A. Brunswikian resources for event-perception research. *Perception* 2009;38:376–98. <http://dx.doi.org/10.1068/p6075>.
- [56] Koffka K. *Principles of Gestalt psychology*. Harcourt, Brace; 1935.
- [57] Kothgassner OD, Felnhofer A. Does virtual reality help to cut the Gordian knot between ecological validity and experimental control? *Ann Int Commun Assoc* 2020;210–8. <http://dx.doi.org/10.1080/23808985.2020.1792790>.
- [58] Kourtesis P, Collina S, Doumas LAA, MacPherson SE. Validation of the Virtual Reality Everyday Assessment Lab (VR-EAL): an immersive virtual reality neuropsychological battery with enhanced ecological validity. *J Int Neuropsychol Soc* 2021;27:181–96. <http://dx.doi.org/10.1017/S1355617720000764>.
- [59] Krakauer JW, Ghazanfar AA, Gomez-marin A, Maciver MA, Poeppel D. Perspective neuroscience needs behavior: correcting a reductionist bias. *Neuron* 2017;93:480–90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuron.2016.12.041>.
- [60] Ladouce S, Donaldson DI, Dudchenko PA, Ietswaart M. Understanding minds in real-world environments: toward a mobile cognition approach. *Frontiers in human neuroscience* 2017;10:694. <http://dx.doi.org/10.3389/fnhum.2016.00694>.
- [61] Ladouce S, Donaldson DI, Dudchenko PA, Ietswaart M. Mobile EEG identifies the re-allocation of attention during real-world activity. *Sci Rep* 2019;9:158511. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-019-51996-y>.
- [62] Lavender JM, Wonderlich SA, Crosby RD, Engel SG, Mitchell JE, Crow S, et al. A naturalistic examination of body checking and dietary restriction in women with anorexia nervosa. *Behav Res Ther* 2013;51:507–11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.brat.2013.05.004>.
- [63] Lee DN, Young DS, McLaughlin CM. A roadside simulation of road crossing for children. *Ergonomics* 1984;27:1271–81. <http://dx.doi.org/10.1080/00140138408963608>.
- [64] Lejuez CW, Richards JB, Read JP, Kahler CW, Ramsey SE, Stuart GL, et al. Evaluation of a behavioral measure of risk taking: the balloon analogue risk task (BART). *J Exp Psychol Appl* 2002;8:75–84. <http://dx.doi.org/10.1037/1076-898X.8.2.75>.
- [65] Lie C-H, Specht K, Marshall JC, Fink GR. Using fMRI to decompose the neural processes underlying the Wisconsin Card Sorting Test. *Neuroimage* 2006;30:1038–49.
- [66] Lucas JW. Theory-testing, generalization, and the problem of external validity. *Social Theory* 2003;21:236–53. <http://dx.doi.org/10.1111/1467-9558.00187>.
- [67] Luyat M, Regia-Corte T. Les affordances: de James Jerome Gibson aux formalisations récentes du concept. *Annee Psychol* 2009;109:297–332. <http://dx.doi.org/10.3917/anpsy.092.0297>.
- [68] Massaro DW. Speech perception by ear and eye: a paradigm for psychological inquiry; 2014. <http://dx.doi.org/10.4324/9781315808253>.
- [69] Mentzel HJ, Gaser C, Volz HP, Rzanny R, Häger F, Sauer H, et al. Cognitive stimulation with the Wisconsin Card Sorting Test: functional MR imaging at 1.5 T. *Radiology* 1998;207:399–404.
- [70] Mesa-Gresa P, Gil-Gómez H, Lozano-Quilis J-A, Gil-Gómez J-A. Effectiveness of virtual reality for children and adolescents with autism spectrum disorder: an evidence-based systematic review. *Sensors* 2018;18:2486. <http://dx.doi.org/10.3390/s18082486>.
- [71] Meyer-Lindenberg A, Tost H. Neural mechanisms of social risk for psychiatric disorders. *Nat Neurosci* 2012;15:663–8. <http://dx.doi.org/10.1038/nn.3083>.
- [72] Milner B. Effects of different brain lesions on card sorting: the role of the frontal lobes. *Arch Neurol* 1963;9:90–100.
- [73] Mizrahi M. Hypothesis testing in scientific practice: an empirical study. *Int Stud Philos Sci* 2020;33:1–21. <http://dx.doi.org/10.1080/02698595.2020.1788348>.
- [74] Myers A, Hansen C. *Experimental psychology*. Thomson Wadsworth; 2006.
- [75] Nastase SA, Goldstein A, Hasson U. Keep it real: rethinking the primacy of experimental control in cognitive neuroscience. *Neuroimage* 2020;222:117254. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117254>.
- [76] Newen A, De Bruin L, Gallagher S. *The Oxford handbook of 4E cognition*. Oxford University Press; 2018.
- [77] Nyhus E, Barceló F. The Wisconsin Card Sorting Test and the cognitive assessment of prefrontal executive functions: a critical update. *Brain Cogn* 2009;71:437–51.
- [78] Pagano CC, Carello C, Turvey MT. Exteroception and exproprioception by dynamic touch are different functions of the inertia tensor. *Percept Psychophys* 1996;58:1191–202. <http://dx.doi.org/10.3758/bf03207552>.
- [79] Park JL, Donaldson DI. Detecting the neural correlates of episodic memory with mobile EEG: recollecting objects in the real world. *Neuroimage* 2019;193:1–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.03.013>.
- [80] Parsons TD. Virtual reality for enhanced ecological validity and experimental control in the clinical, affective and social neurosciences. *Front Hum Neurosci* 2015;9:1–19. <http://dx.doi.org/10.3389/fnhum.2015.00660>.
- [81] Peng J, Jury EC, Dönnies P, Ciurtin C. Machine learning techniques for personalised medicine approaches in immune-mediated chronic inflammatory diseases: applications and challenges. *Front Pharmacol* 2021;12:1–18. <http://dx.doi.org/10.3389/fphar.2021.720694>.
- [82] Poldrack RA. Imaging brain plasticity: conceptual and methodological issues – a theoretical review. *Neuroimage* 2000;12:1–13. <http://dx.doi.org/10.1006/nimg.2000.0596>.
- [83] Poldrack RA. Inferring mental states from neuroimaging data: from reverse inference to large-scale decoding. *Neuron* 2011;72:692–7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuron.2011.11.001>.
- [84] Popper KR. *The logic of scientific discovery*. London: Hutchinson; 1959.
- [85] Reed ES, James J. *Gibson and the psychology of perception*. Yale University Press; 1988.
- [86] Ribba B, Dudal S, Lavé T, Peck RW. Model-informed artificial intelligence: reinforcement learning for precision dosing. *Clin Pharmacol Ther* 2020;107:853–7. <http://dx.doi.org/10.1002/cpt.1777>.
- [87] Robinson GA, Peng J, Dönnies P, Coelewijn L, Naja M, Radziszewska A, et al. Disease-associated and patient-specific immune cell signatures in juvenile-onset systemic lupus erythematosus: patient stratification using a machine-learning approach. *Lancet Rheumatol* 2020;2:e485–96. [http://dx.doi.org/10.1016/S2665-9913\(20\)30168-5](http://dx.doi.org/10.1016/S2665-9913(20)30168-5).
- [88] Rus-Calafell M, Garety P, Sason E, Craig TJK, Valmaggia LR. Virtual reality in the assessment and treatment of psychosis: a systematic review of its utility, acceptability and effectiveness. *Psychol Med* 2018;48:362–91. <http://dx.doi.org/10.1017/S0033291717001945>.
- [89] Sahai H, Ageel MI. *The analysis of variance: fixed, random and mixed models*. Springer Science & Business Media; 2012.
- [90] Scanlon JEM, Redman EX, Kuziek JWP, Mathewson KE. A ride in the park: cycling in different outdoor environments modulates the auditory evoked potentials. *Int J Psychophysiol* 2020;151:59–69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2020.02.016>.
- [91] Schmuckler MA. What is ecological validity? A dimensional analysis. *Infancy* 2011;2:419–36. http://dx.doi.org/10.1207/S15327078IN0204_02.
- [92] Shiffman S, Stone AA, Hufford MR. Ecological momentary assessment. *Annu Rev Clin Psychol* 2008;4:1–32. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.clinpsy.3.022806.091415>.
- [93] Steiner MD, Frey R. Representative design in psychological assessment: a case study using the Balloon Analogue Risk Task (BART). *J Exp Psychol Gen* 2021;150:2117–36. <http://dx.doi.org/10.1037/xge0001036>.
- [94] Thorndike EL, McCall WA, Chapman JC. *Ventilation in relation to mental work*, 78. Teachers College, Columbia University; 1916.
- [95] Tost H, Champagne FA, Meyer-Lindenberg A. Environmental influence in the brain, human welfare and mental health. *Nat Neurosci* 2015;18:4121–31. <http://dx.doi.org/10.1038/nn.4108>.
- [96] Uddin S, Khan A, Hossain ME, Moni MA. Comparing different supervised machine learning algorithms for disease prediction. *BMC Med Inform Decis Mak* 2019;19:1–16. <http://dx.doi.org/10.1186/s12911-019-1004-8>.
- [97] Vallet W, van Wassenhove V. Can cognitive neuroscience solve the lab-dilemma by going wild? *Neurosci Biobehav Rev* 2023;155:105463. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neubiorev.2023.105463>.
- [98] Varela FJ, Thompson E, Rosch E. *The embodied mind, revised edition: cognitive science and human experience*. MIT press; 2017.
- [99] Vicente KJ. Beyond the lens model and direct perception: toward a broader ecological psychology. *Ecol Psychol* 2003;15:241–67. http://dx.doi.org/10.1207/S15326969ECO1503_4.
- [100] Vu MAT, Adali T, Ba D, Buzsáki G, Carlson D, Heller K, et al. A shared vision for machine learning in neuroscience. *J Neurosci* 2018;38:1601–7. <http://dx.doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0508-17.2018>.
- [101] Wang Y, Zhao Y, Therneau TM, Atkinson EJ, Tafti AP, Zhang N, et al. Unsupervised machine learning for the discovery of latent disease clusters and patient subgroups using electronic health records. *J Biomed Inform* 2020;102:103364. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jbi.2019.103364>.
- [102] Wunderlich A, Gramann K. Eye movement-related brain potentials during assisted navigation in real-world environments. *Eur J Neurosci* 2021;54:8336–54. <http://dx.doi.org/10.1111/ejn.15095>.
- [103] Wundt WM. *Beiträge zur theorie der sinneswahrnehmung*. CF Winter; 1862.
- [104] Wundt WM. *Grundzüge der physiologischen Psychologie*, 2. W. Engelmann; 1893.
- [105] Yates F. *The design and analysis of factorial experiments*; 1937.
- [106] Zhao Y, Zeng D, Socinski MA, Kosorok MR. Reinforcement learning strategies for clinical trials in nonsmall cell lung cancer. *Biometrics* 2011;67:1422–33. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1541-0420.2011.01572.x>.
- [107] Zink R, Hunyadi B, Huffel Van S, Vos De M. Mobile EEG on the bike: disentangling attentional and physical contributions to auditory attention tasks. *J Neural Eng* 2016;13:046017. <http://dx.doi.org/10.1088/1741-2560/13/4/046017>.