

Special Issue

Tasks in Science Education

Research-Based Report of Practice

Développer le raisonnement par ordre de grandeur et semi quantitatif : une séquence d'enseignement testée sur le terrain

Cedric Loretan^{1,2}, Andreas Müller¹, Laura Weiss¹, Sebastien Roch³

Received: February 2021 / Accepted: August 2021

Structured Abstract

Background: "Order of Magnitude Reasoning" (OMR) relies on the use of approximate data and/or calculations to quickly find answers to numerical scientific questions to the powers of 10. More generally, OMR is an element of Semi-Quantitative Reasoning (SQR), defined by the four basic skills of ordering, grouping, representing and estimating quantities. Here, OMR is mainly linked to the skills of representing and estimating.

Both OMR and SQR are well known and have a distinctive, important role within science ("Fermi questions", "back-of-the-envelope" estimation). They provide estimates otherwise hard to obtain by precise calculations, and e.g. to check the plausibility of a claim or a result.

Purpose: we argue, based on existing literature, that OMR and SQR are also an essential part of scientific literacy, e.g. in supporting a critical attitude towards numbers and quantitative information that can be found in the media. However, learning SQR and OMR is complex, and demanding, e.g. with respect to cognitive load. We suggest Worked Examples (WE) as promising teaching and learning approach. In this research-based report of practice we present in detail a teaching and learning sequence aimed to develop SQR and OMR with WE as educational support, based on background research providing evidence for the effectiveness of the approach.

Sample/Setting: classroom implementation and its empirical investigation were carried out with students ($N = 59$) in first year of secondary level II.

Design and Methods: a teaching experiment using the approach on the topic "spatial and temporal scales in an astronomical context" for is presented, combined with a quasi-experimental pre/post-test comparison study (with vs. without WEs; same content, lesson plan and teacher). A focus of this study is to describe the sequence and its suitability for different study plans. The practical implementation and learning materials are described in detail, in particular how the teacher unfolds the sequence, the time required, and WEs intended to develop essential procedural skills, and near and far transfer. For the empirical investigation, research validated instruments for learning outcomes covering both conceptual and technical aspect of SQR were used.

Results are promising and support the use of the WE for learning SQR. No obstacles or drawbacks concerning practical feasibility were found, and the acquisition of all tested outcomes is higher among students who learn with WE and this (with one exception) by factors > 2 .

Conclusions/Implications for classroom practice and future research: the use of worked examples has been shown to large considerable positive effects on the acquisition of OMR and SQR, including transfer. Some limitations are discussed, such as for the improvement of far transfer, turning out to be smaller than for the other tested competences. As perspectives, the potential of the approach is discussed with respect to other disciplines such as biology, or its effect on the understanding of the Nature of Science (NoS).

Keywords: *order-of-magnitude reasoning, semi-quantitative reasoning, estimation skills, critical attitude, worked examples*

¹Université de Genève, ²Lycée-Collège de l'Abbaye de St-Maurice, ³Académie de Grenoble
✉ Cedric.Loretan@etu.unige.ch

1 Introduction – cadre et bases de recherche¹

Le « Raisonement par Ordre de Grandeur » (ROG) exploite des données approchées à la puissance de 10 près (ordre de grandeur) afin de trouver rapidement les réponses à des questions scientifiques quantitatives (Loretan et al., 2018a). Appartenant au « Raisonement Semi Quantitatif » (RSQ) qui est défini par la mise en œuvre de quatre compétences de base : ordonner, grouper, représenter et estimer des grandeurs (cf. Tab. 1) (Delgado, et al., 2007 ; Delgado, 2009), le ROG est tout particulièrement lié aux compétences "représenter" et "estimer" du RSQ, avec comme élément-clé la recherche par des raisonnements mathématiques simples d'une solution approximative.

Tab. 1. Les quatre composantes du « Raisonement Semi Quantitatif » : ordonner, grouper, représenter et estimer des grandeurs (Delgado et al., 2007 ; Delgado, 2009 ; Loretan et al., 2018a).

- I) **Ordonner** des grandeurs. Exemple : ordonner les grandeurs suivantes : la distance Terre-Lune, le diamètre du Soleil, le rayon de la Voie lactée, la distance nous séparant de l'étoile la plus proche (Alpha du Centaure).
- II) **Grouper** des grandeurs. Exemple : grouper les grandeurs « de petits objets » atome, molécule d'eau, bactérie, cellule, fourmi, puce en trois groupes.
- III) **Représenter** des grandeurs (exprimer la taille d'un objet en fonction d'un autre). Exemple : quel est le rapport entre ces grandeurs ? La hauteur d'une villa et la taille d'une fourmi ; la masse d'un homme et la masse de la Lune ; le volume d'une bouteille d'un litre de lait et le volume d'une chambre.
- IV) **Estimer** une grandeur. Exemple : estimer la masse d'air contenue dans la salle de classe, estimer l'aire d'un court de tennis, estimer le nombre de piquets nécessaires pour poser une barrière autour d'un terrain de football, chaque piquet se trouvant à un mètre l'un de l'autre.

Le RSQ et le ROG permettent à toute personne qui les pratique de développer sa pensée critique (Callan et al., 2009) par la vérification de l'information quantitative qui se trouve dans les médias, trop souvent simplement parachutée sans véritables explications, ainsi que de répondre à des questions socialement vives (Legardez & Simonneaux, 2006).

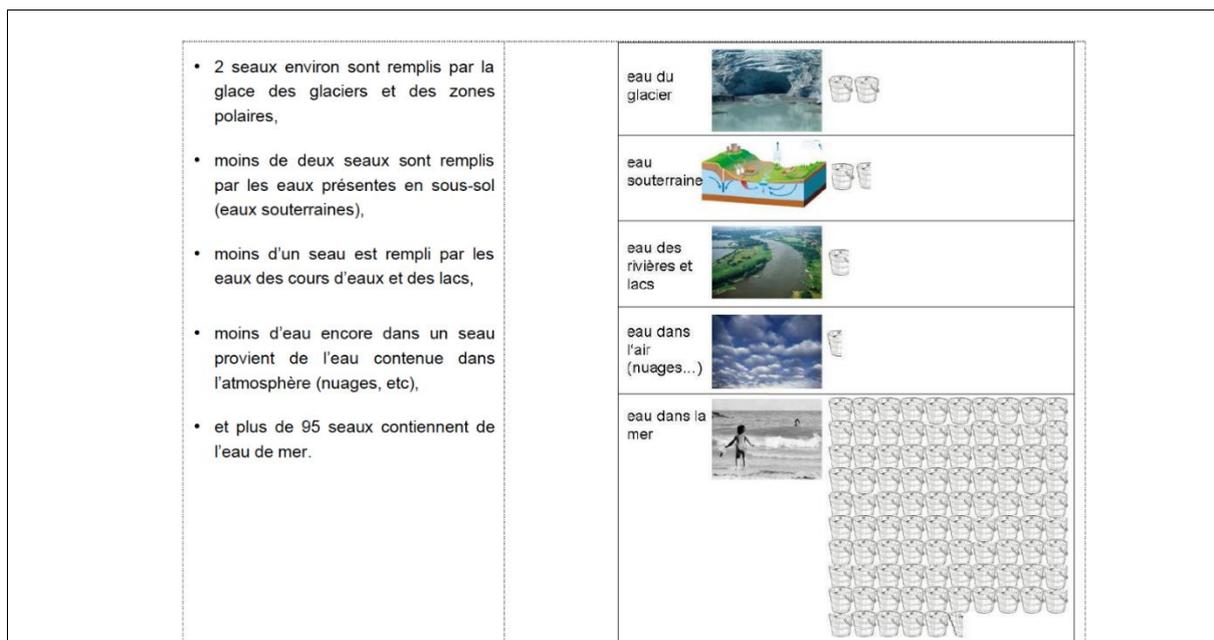
La Fig. 1 propose un exemple de situation où est mis en évidence le fait que des calculs basiques, appliqués à des questions scientifiques, permettent d'abandonner une posture passive face aux informations transmises par les médias et de faciliter un approfondissement de la réflexion. Le RSQ constitue donc une base de savoirs, de compétences et d'attitudes basées sur des mathématiques élémentaires, et, comme nous allons le montrer dans cette contribution, en même temps, une base pour l'acquisition de savoirs et de compétences dans un sens plus large (culture scientifique, raisonnement critique, etc.) pouvant enrichir un citoyen dans son quotidien, et tout au long de sa vie (Loretan et al., 2018a).

En sciences, le raisonnement par ordre de grandeur (à la base des "questions de Fermi"¹) occupe une place importante (Morrison, 1965 ; Swartz, 2003 ; Weinstein & Adam, 2008 ; Mahajan, 2010). Il est par exemple utilisé dans l'enseignement : (i) de la chimie, où il permet d'établir un lien entre les domaines microscopiques et macroscopiques (Gerlach & al., 2014); (ii) des nanosciences, pour une compréhension approfondie des échelles nanoscopiques (Jones & al., 2003, Light & al., 2013 ; (iii) de la physique, « the Physics Teacher » y consacre, à chaque édition depuis plus d'une décennie, une page entière sur le sujet (Weinstein, 2007); (iv) de la géographie et de la biologie avec le concept central de « deep time » (Trend, 2001 ; Libarkin & al., 2007 ; Catley & Novick, 2009 ; Cotner & al., 2010; Delgado, 2013) ; (v) et enfin de la science au sens large avec les concepts de longueurs et de dimensions (Delgado & al., 2007 ; Delgado, 2009 ; Jones & al., 2011 ; Swarat & al., 2011) ou d'échelles de temps (Lee & al., 2011).

Cependant, comme souligné par Loretan et al. (2018b) de sérieuses difficultés d'apprentissage empêchent le développement du RSQ à l'école. Un premier groupe de difficultés est d'ordre conceptuel : la représentation insuffisante des grands et petits nombres, et la difficulté à comprendre les notions d'unité de mesure, d'approximation et d'estimation, d'échelle, d'ordre de grandeur, et leur importance (Hawking, 1978 ; Tretter, et al., 2006 ; Delgado, 2009 ; Catley & Novick, 2009 ; AAPT, 2009 ; National Research Council, 2009). Un deuxième groupe comprend des compétences techniques telles que les changements d'unités, l'utilisation des puissances de 10 et la proportionnalité (Butterfield et al., 2000 ; AAPT, 2009 ; Eberle & al., 2015). Le troisième type est la combinaison des difficultés conceptuelles et techniques, provoquant une charge cognitive élevée (Van Merriënboer & Sweller, 2005; Plass et al., 2010 ; Tindal-Ford et al., 2020).

¹La base de recherche de cette contribution est identique à celle d'un premier « Research-based Report of Practice » de ce projet (Loretan, Müller, & Weiss, 2018c), et quelques passages sont basés sur cet article antérieur.

²Pour une définition courante des questions de Fermi: (Weinstein, 2007): "This [estimation] is important in order to apply physics to the real world, to see if your answer to a physics problem is reasonable, and to make sense of the world around us". Estimation questions are often called "Fermi Questions" because of Enrico Fermi's legendary estimation ability (et pour son utilisation créative et fréquente lors de discussions et à travers son enseignement).



Question: La partie gauche de l'image illustre la distribution de l'eau à différents endroits de la biosphère. Pour cet exemple la quantité totale d'eau est contenue dans 100 seaux [CDIP10]. Sur la base de ces données, faire une estimation de la montée du niveau des mers suite à la fonte de l'eau des glaciers et des zones polaires afin de vérifier si l'information, présente dans le débat public où l'élévation est estimée à environ 80 m, est vraie (v. par exemple https://fr.wikipedia.org/wiki/Niveau_de_la_mer).

Réponse: Selon le graphique, la quantité d'eau des glaciers et des zones polaires est égale à 2% de la quantité d'eau des mers. Un raisonnement très simplifié traite les océans sur Terre comme un bassin rectangulaire d'une surface fixe, où ajouter x % d'eau produira une montée de x % de la profondeur initiale. Si on regarde dans un atlas, une profondeur typique des océans est de quelques kilomètres, dont 2% donnent quelques dizaines de mètres de changement. Cherchant une valeur plus précise, on trouve une profondeur moyenne des océans de 3800 m (par exemple : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Océan#Dimensions>), donc 2% correspond à peu près à 80 m. Dans les deux cas, on trouve le bon ordre de grandeur (avec une précision variable selon celle des données utilisées), avec son propre raisonnement, et pas par croyance.

Fig. 1. Exemple de tâche RSQ sur une question vive (le réchauffement climatique): estimer la montée du niveau des mers par la fonte de l'eau des glaciers et des zones polaires.

Remarques : (i) l'argumentation dans la réponse peut être complétée à plusieurs égards (par exemple la justification de la simplification de base, à savoir les océans modélisés comme un bassin rectangulaire. (ii) Cette tâche a été inspirée par une des tâches utilisées par le test HARMOS-Sciences pour le niveau primaire [CDIP10] ; l'exemple montre, comment la créativité de l'enseignant peut l'amener à utiliser des moyens d'enseignement existants pour construire des tâches permettant de développer le raisonnement semi-quantitatif.

Apprendre le RSQ est donc complexe et son enseignement doit prendre en compte ces difficultés. Pour soutenir l'apprentissage, tout en diminuant la surcharge cognitive, une approche prometteuse et bien étudiée est le « Worked (out) Example » (WE) (Atkinson et al., 2000), nommé « exemple ciblé » dans la littérature francophone (Gautier & Jobin, 2009) ; on se référera aussi à Crippen & Brooks (2009) ; Dockett & Mestre (2014) et Renkl (2017) pour des exemples d'utilisation dans l'enseignement des sciences et des mathématiques. Le WE est défini comme une illustration de la manière de résoudre un problème par des experts en justifiant les différentes étapes (Catley & Novick, 2009; Clark et al., 2006). Son objectif est de fournir des modèles de résolution experte à étudier et imiter (Atkinson et al., 2000). D'un point de vue de la charge cognitive, le WE permet l'automatisation des schémas ou « routines » de résolution dans la mémoire à long terme (Sweller et al., 1998). Le WE est un apprentissage actif, par lequel l'apprenant s'approprie le « comment » (stratégies) et le « pourquoi » (principes) d'approches efficaces, souvent implicites chez les experts (Renkl et al., 2002 ; Van Gog et al., 2004). L'ajout d'explications orientées vers le processus permet d'améliorer la performance de transfert, spécialement dans le cas de compétences cognitives complexes comme celles du RSQ. L'efficacité de la pratique du WE a été mise en évidence dans de nombreuses études, particulièrement en ce qui concerne la réduction de la charge cognitive (Sweller, 2006). Des méta-analyses ont fourni des tailles d'effets avec de valeurs de Cohen d égales à 0.62 au secondaire et allant jusqu'à 0.73 dans les premières années universitaires (Crissman,

2006)². Certaines méta-analyses donnent des valeurs de d égales à 0.55 pour l'enseignement au sens large, sans distinction disciplinaire, jusqu'à des valeurs de 0.7 pour l'apprentissage en physique (Crissman, 2006; Hattie, 2009).

Malgré l'importance du sujet (comme relevé ci-dessus), et quelques interventions pour améliorer des notions spécifiques, par exemple le « deep time » (Delgado, 2009) et, dans une façon limitée, les grands nombres (≤ 1000 , pour des élèves du primaire ; Opfer et Siegler, 2007), il n'y a pas encore de véritables interventions et études visant le ROG/RSQ basées sur la recherche en didactique des sciences, et ciblées pour soutenir les apprentissages des élèves face à leurs difficultés. Une telle intervention est un des objectifs principaux du projet de recherche et de développement didactiques présentés ici.

Une séquence d'enseignement (Loretan, 2021)³ qui développe les compétences RSQ et ROG, y compris un regard critique envers des constats quantitatifs, et articulée par des WE, a été donc produite et est détaillée dans la suite de cet article sous la forme d'un « Research-Based Report of Practice » (RBRP).

En termes de compétences, la séquence décrite ci-dessous vise à développer (v. 2.3 et Loretan et al., 2018c):

- La capacité à savoir exploiter l'information pour estimer, puis ordonner, grouper et représenter ces estimations (construction d'échelles qui deviennent ainsi des outils pour de nouvelles perspectives dans la capacité d'estimation).
- La maîtrise de l'usage d'outils mathématiques (notation scientifique, proportionnalité et comparaison des grandeurs impliquées).
- L'acquisition d'un bagage de culture scientifique qui devient un savoir fluide et actif à travers les compétences évoquées ci-dessus.

Pour l'évaluation des apprentissages des élèves, et de l'efficacité des WE comme dispositif didactique, un test de plusieurs compétences fondamentales pour le RSQ a été développé (compétences numériques et techniques, échelles spatiales et temporelles, unités), et complété par quelques autres tâches, en particulier pour tester le transfert proche et lointain⁴.

Des comptes rendus approfondis de l'étude empirique (méthodes, résultats) menée sur ce dispositif didactique peuvent être trouvés dans Loretan et al. (2018c) et Loretan (2021). Un premier RBRP (Loretan et al., 2018a) rapporte une séquence sur un autre sujet (masse volumique, poussée d'Archimède) et discute les liens avec la numération et les plans d'études aux niveaux suisse et international (Loretan et al., 2018b). Finalement, quelques exemples des « questions de Fermi » développées dans ce projet se trouvent dans Weiss (2014), Allart et al. (2014) et Müller & Loretan (2016).

2 La séquence d'enseignement «une immersion dans l'espace et le temps»

2.1 Introduction

Extrait de l'introduction à la séquence : « *Un simple regard depuis le hublot d'un avion permet d'apprécier le paysage, comme par exemple la forme d'une forêt, alors que pourtant seuls des arbres sont visibles depuis l'observation au sol. Les arbres sont certes importants, les détails sont importants, mais c'est souvent en s'éloignant d'eux qu'une structure plus grande devient visible. Il est souvent plus facile d'apprendre et de comprendre les détails une fois que la "grande image" a été perçue. Si tous les objets de l'Univers étaient très proches en matière de grandeurs diverses (dimensions, énergie, vitesse...), les détails seraient alors cruciaux et les approximations n'auraient pas lieu d'être. Pour notre plus grand plaisir, l'Univers présente des grandeurs variant sur des échelles extrêmement larges. D'un côté, le tout petit et de l'autre le très grand. Entre deux, les contrastes sont si spectaculaires que rechercher la précision dans un premier temps serait le meilleur moyen de faire fausse route.* »

Dans ce petit texte introductif, l'esprit du RSQ est résumé en quelques phrases. En effet cette séquence d'enseignement a pour but de construire la capacité à percevoir la grande image avant de rechercher les détails.

2.2 Structure et contenus de la séquence

La séquence d'enseignement est découpée en quatre sections :

- Immersion
- Construction d'échelles spatiales et temporelles, notamment dans un contexte astronomique (distances propres à notre système solaire et au-delà, histoire de la terre). Cette section se construit avec 2 WE accompagnés de 3 autres WE se trouvant en annexe (rappels sur les opérations avec des puissances de 10, la notation scientifique et les changements d'unité).

³Les seuils conventionnels pour la pertinence pratique exprimée par Cohen's d sont : effets petits, moyens, grands, correspondant à $0.2 < d < 0.5$, $0.5 \leq d < 0.8$ et $0.8 \leq d$ (Cohen, 1988).

⁴La séquence d'enseignement (version élève prête à être distribuée et version enseignant-e) peut être consultée dans les archives ouvertes de l'UNIGE (<https://archive-ouverte.unige.ch/unige:154641>).

⁵Selon Barnett & Ceci (2002) : le transfert proche est défini comme « transfer from initial learning that is situated in a given setting to ones that are closely related » et le transfert lointain comme « the ability to use what was learned in one setting to a different one as well as the ability to solve novel problems that share a common structure with the knowledge initially acquired ».

3. Le concept physique de vitesse moyenne $v = d/t$ (entre autres en lien avec l'année-lumière). Ici la section est construite avec 4 WE.
4. L'idée de comparaison des grandeurs impliquées et de proportionnalité. Pour cette dernière section 2 WE sont proposés.

Tab. 2. Structure de la séquence et de son évaluation.

Sem.	Sections	Activités
1		Immersion, pré-test
2-6	1	Étude du WE 1 par groupes de 2
		Présentation de la solution du WE présente dans leur manuel par un des groupes.
		Échange et discussion entre les groupes des différentes étapes de la solution proposée.
		Idem pour les autres WE
		Exercices de transfert proche
		Exercices de transfert lointain
	2, 3	Procédure identique à la section 1
7		Révision
8		Post-test

Le pré-test se compose : (i) des tâches portant sur plusieurs compétences fondamentales du RSQ, telles que les compétences techniques (avec des transformations d'unités et les opérations avec des puissances de 10), et conceptuelles (avec les échelles spatiales et temporelles) (Tab. 5). (ii) d'un questionnaire à choix multiple portant sur différentes dimensions du RSQ (voir la section évaluation plus bas dans l'article) ; le post-test comprend en plus, des tâches de transfert proche et lointain pour le RSQ (Tab. 4). Le groupe de contrôle suit la même structure et étudie les mêmes exercices que le groupe de traitement, mais sans le support par les WE, les élèves ne reçoivent donc pas de manuel de la séquence.

Lors de la première semaine une phase d'immersion (2-3 périodes) est proposée aux élèves. Elle consiste en un certain nombre de postes disposés chacun sur une table (durée approximative de chaque poste entre 5 et 10 min.). Les élèves sont par groupes de deux et avancent de poste en poste pour y accomplir des tâches qui les invitent à s'exprimer et à interagir avec des objets et des phénomènes liés à des échelles spatiales et temporelles. A chaque poste les élèves doivent remplir une feuille où il leur est demandé de présenter en quelques phrases leurs idées ou de répondre à des questions en lien avec le poste. D'un point de vue didactique, l'idée de cette activité d'immersion est de faire émerger les préconceptions des élèves, de les familiariser au contenu de la future séquence (enrichir leur capital d'expériences vécues qui sera utile ultérieurement) et de susciter des questions. Le rôle de l'enseignant-e est d'observer ses élèves aux prises avec un nouveau milieu et recueillir leurs conceptions dans des situations concrètes. A titre d'exemple, le poste 3 est une balade dans l'application « solar walk » qui permet la découverte du système solaire, le poste 4 s'intitule « how far is it to Mars (<http://www.distanctomars.com/>) où la distance nous séparant de Mars est représentée sous la forme de pixel. Au total, 9 postes différents constituent cette immersion.

Durant les semaines 2 à 6, soit un total de 20 périodes d'enseignement, l'enseignant-e déroule la séquence principale, divisée en trois sections. La première se focalise sur la construction des échelles spatiales de notre système solaire et au-delà, de l'infiniment petit à l'infiniment grand, et des échelles temporelles (notamment liées à l'histoire de la Terre). La deuxième section permet de travailler le concept physique de vitesse moyenne en y introduisant le format standard de la notation scientifique et le calcul avec des ordres de grandeurs. Pour finir, la troisième section développe le concept de proportionnalité et de comparaison de grandeurs impliquées. Le **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** présente une vue d'ensemble de la manière d'utiliser la séquence et comment nous avons procédé à son évaluation.

Afin d'assurer une fluidité de lecture et d'éviter d'alourdir la séquence, de nombreux renvois à une annexe structurée en 5 parties sont présents :

Une partie A, donnant la description de la phase d'immersion à réaliser en début de séquence avant de débiter les activités présentes dans la version de l'élève ; une partie B qui décrit dans les détails la pratique du WE, sa lecture approfondie est nécessaire pour ne pas considérer cet outil didactique comme une simple recette de cuisine, mais plutôt comme une porte d'entrée vers une compréhension profonde de la façon dont un-e expert-e résout un problème ; les parties C, D, E, qui contiennent des images utiles à la séquence ; une partie F constituée d'une série de WE sur les puissances de 10, la notation scientifique et la comparaison de grandeurs impliquées ; une partie G traitant des changements d'unités ; enfin la partie H, qui regroupe les solutions des divers exercices proposés dans la séquence.

Ci-dessous, à titre d'exemple, est proposée une description détaillée de la section 3 de la séquence portant sur la vitesse moyenne.

Section 3. Le concept physique de la vitesse moyenne $v = d / t$

Chaque début de section commence par un WE que les élèves vont étudier par petits groupes. La Fig. 2 présente une copie d'écran du premier WE de cette section.

WE 1 : Calculer la durée d'une année en secondes. Choisir un degré de précision afin de pouvoir retenir cette valeur par cœur.

Cherchons dans un premier temps à calculer le nombre de secondes qu'il y a dans une année. Nous savons que l'année comporte 365 jours, représentant approximativement le temps mis par la Terre pour effectuer une orbite complète autour du Soleil. Une journée terrestre possède 24 heures, chacune comptant 3600 secondes (60 secondes dans une minute et 60 minutes dans une heure). Mathématiquement cela se traduit de la façon suivante :

$$1 \text{ année} = 365 \text{ jours} \cdot 24 \frac{\text{heures}}{\text{jours}} \cdot 3600 \frac{\text{secondes}}{\text{heure}}$$

Face à ce calcul, faut-il foncer « tête baissée » sur une calculatrice ou peut-on l'effectuer sans son usage ? En optant pour la deuxième option le raisonnement est le suivant : Dans un premier temps, une simple observation indique que tout semble être un peu dans le désordre. Un outil mathématique, très utile dans ce genre de situation et qui permet de rectifier cela est la notation scientifique, présenté ci-dessous et déjà rencontré dans le WE 2 de l'annexe A sous la forme $a \cdot 10^n$. Comme nous sommes ici en physique, les unités viennent s'ajouter pour donner :

Produit de facteurs * Puissance de dix * Unités

Dont l'usage va se révéler très utile :

$$1 \text{ année} = 3.65 \cdot 10^2 \text{ jours} \cdot 2.4 \cdot 10^1 \frac{\text{heures}}{\text{jours}} \cdot 3.6 \cdot 10^3 \frac{\text{secondes}}{\text{heures}}$$

$$1 \text{ année} = (3.65 \cdot 2.4 \cdot 3.6) \cdot 10^{2+1+3} \cdot \frac{\text{jours} \cdot \text{heures} \cdot \text{secondes}}{\text{jours} \cdot \text{heures}}$$

$$1 \text{ année} = (3.65 \cdot 2.4 \cdot 3.6) \cdot 10^{2+1+3} \text{ s}$$

$$1 \text{ année} \approx 30 \cdot 10^6 \text{ s}$$

$$1 \text{ année} \approx 3 \cdot 10^7 \text{ s}$$

Nous obtenons ainsi une très bonne approximation du résultat recherché et très certainement en moins de temps que celui qui aurait été nécessaire à la calculatrice et à son utilisateur. Et oui, l'approximation est bien un outil fort utile aux scientifiques.

Fig. 2. 1^{er} WE de la section 3 de la séquence.

Dans ce WE l'enseignant-e présente les différentes étapes menant à la solution avec des commentaires sur sa façon de raisonner. L'objectif du WE est donc de travailler des compétences techniques en minimisant la charge cognitive par la présentation détaillée des étapes effectuées pour la résolution de la tâche. Afin d'utiliser ce résultat et comme argument de l'utilité de connaître un résultat approximatif par cœur, le deuxième WE permet de calculer la distance parcourue par la lumière en une année (l'année lumière [a.l]) en km : $d \approx 10^{13}$ km.

La suite de la section contient d'autres WE en isolant à chaque fois un facteur différent : la distance, le temps, puis la vitesse qui relie distance et temps. Une fois les WE étudiés, des exercices permettant un transfert proche sont proposés aux élèves (Fig. 3). L'idée de ces exercices simples est, au-delà de stabiliser la compréhension, de valoriser le « self concept » des élèves.

Ex 1 : L'étoile la plus proche du Soleil (Proxima Centauri) se trouve à environ $4.2 \cdot 10^{13}$ km. Si une petite planète orbitant autour de cette étoile abritait une forme de vie similaire à la nôtre, combien de temps (s, min, heures, jours, années ?) serait nécessaire pour un simple petit « Hello » ?

Fig. 3. Exemple d'exercice permettant le transfert proche pour le lien entre v, d et t.

Pour conclure chaque section, des exercices demandant un transfert lointain sont donnés aux élèves (Fig. 4). Comme on peut le voir à la lecture de l'exemple ci-après, un transfert direct de ce qui a été étudié dans les divers WE n'est pas suffisant, d'autres compétences doivent être mobilisées, raison pour laquelle il est catégorisé de transfert lointain.

Ex 7 : Pendant le temps de toute une vie (environ 90 années terrestre), la longueur maximale qu'un cheveu pourrait atteindre serait d'environ 10 m. Cela suppose évidemment que sa durée d'existence corresponde à celle de la personne qui le possède. Bien sûr cette information n'est pas exacte car l'espérance de vie moyenne pour un cheveu est d'environ 5 ans...

Ci-dessous différents records de longueurs pour des cheveux, moustaches et barbes.

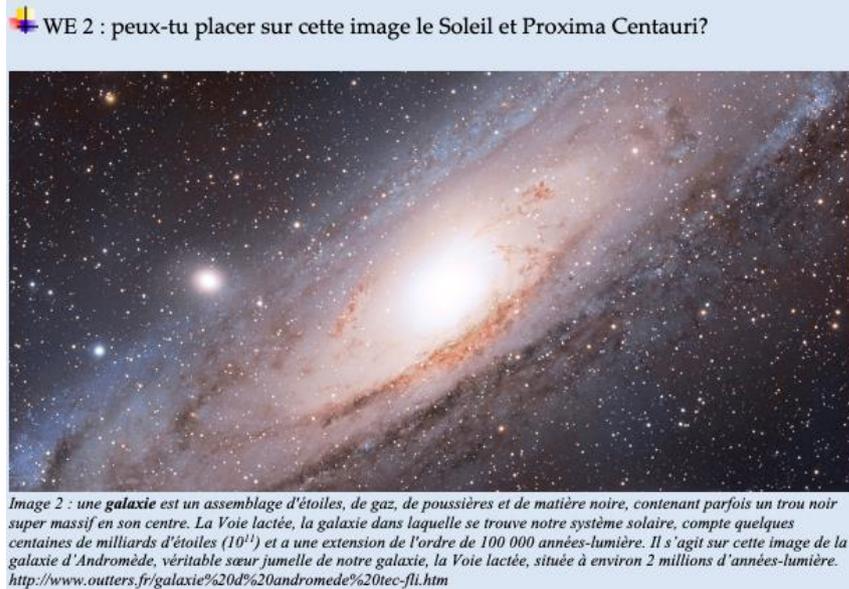


A l'aide des informations présentes dans le texte ci-dessus et des images, calculer la vitesse de croissance d'un cheveu.

Fig. 4. Exercice permettant un transfert lointain.

Ainsi, de façon générale, chaque section est divisée en trois parties. Une première, composée de WE à étudier, permettant à l'élève d'intégrer, à son rythme, les outils mathématiques, mais aussi selon les cas d'apprendre à développer un regard critique face à l'information et d'éliminer parfois certaines fausses préconceptions. Dans l'exemple de la Fig. 4, le calcul menant à la vitesse de croissance des cheveux permet par exemple de comparer cette vitesse à celle du déplacement des continents et de constater que ces deux vitesses sont quasi similaires. On construit donc ici de la culture scientifique essentielle au regard critique. La Fig. 4 en annexe présente un exemple de WE de la séquence permettant de développer le regard critique.

La deuxième partie consiste à résoudre des tâches de transfert proche en appliquant ce qui a été vu dans les WE de la première phase. L'objectif étant ici de stabiliser les compétences acquises et de gagner de la confiance aux élèves apprenant-e-s. Finalement, lorsque les compétences et le « self-concept » sont suffisamment développés, des tâches de transfert lointain plus exigeantes sont données aux élèves. Pour illustrer ces principes d'action, la Fig. 5 propose un WE tiré de la section 3 et son exercice associé de transfert proche.



L'information présente dans la légende de l'image 2 indique que la galaxie a une extension de l'ordre de 100 000 années-lumière. Ce qui correspond à environ 25 cm sur l'image 2. Attention la galaxie sur l'image n'est pas représentée entièrement. Il est donc essentiel de la prolonger aux deux extrémités et ainsi les 25 cm se justifient. Quant à Proxima Centauri sa distance au Soleil est d'environ 4.2 années-lumière (voir WE 1 de cette section).

Le problème est similaire au WE précédent, ainsi:

$$\begin{aligned} 100000 \text{ a.l} &\rightarrow 250 \text{ mm} \\ 4.2 \text{ a.l} &\rightarrow ? \text{ mm} \end{aligned}$$

$100'000 / 4 = 25'000$, 100'000 est donc environ 25'000 fois plus grand que 4.2. Il suffit de diviser 250 par 25'000 et à l'aide de la notation scientifique ; ce calcul est trivial $\frac{250}{25 \cdot 10^3} = 10 \cdot 10^{-3} = 10^{-2}$. Nous obtenons ainsi 0.01 mm, un centième de mm, même pas un petit point avec votre crayon bien taillé !

Ma parole, si ça continue ainsi, les piles de ma calculatrice vont entièrement se décharger alors même que je ne l'ai encore point utilisée. Malgré la complexité du thème et de la grandeur des nombres impliqués, qui peuvent faire peur, avec quelques notions de base sur les puissances de 10, le format standard de la notation scientifique, des notions de proportionnalité et de comparaison, il est possible d'obtenir des résultats qui permettent de nous représenter simplement les grands objets de notre univers.

Ex 1 : la galaxie d'Andromède se situe à $\approx 2 \cdot 10^6$ a.l. du Soleil A quelle distance de l'image 2 se trouverait-elle (selon échelle de l'image 2, p.22) ?

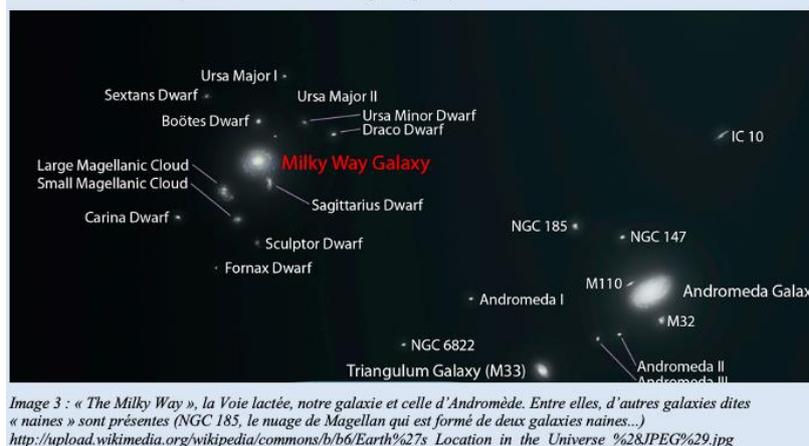


Fig. 5. Le WE (WE 2) présente la démarche de calculs pour placer sur l'image (en haut) le Soleil et Proxima Centauri. Il est suivi d'un exercice de transfert (Ex 1, image 3) où il est demandé de trouver quelle serait la position de la galaxie d'Andromède selon l'échelle de l'image utilisée dans le WE 2.

2.3 Public cible et plans d'études

La séquence est conçue pour des élèves de la 1^{ère} année de secondaire II⁵ ayant la physique en discipline fondamentale, à savoir un cours obligatoire quelle que soit l'orientation choisie (biologie-chimie, économie, espagnol...). Un autre cadre possible sont des cours de type « initiation à la démarche scientifique », là où ils existent. A titre d'exemple, voici les objectifs visés par la séquence selon deux plans d'études :

Dans le plan d'étude de l'école de maturité vaudoise, pour les élèves de 1^{ère} année ayant la physique en discipline fondamentale, l'astronomie est l'un des éléments traités, avec les objectifs suivants :

- Notions : de l'infiniment grand à l'infiniment petit ;
- Savoir-faire (compétences) : mesurer des grandeurs et apprécier leur degré de précision, analyser des observations, appliquer l'esprit critique⁶, estimer des ordres de grandeur ;
- Attitudes : prise de recul face au sens commun, esprit critique⁶, curiosité.

Pour le cours d'IDS (Collège de Saussure, Genève, 2015-16), les sujets proposés sont :

- Grandeurs, unités
- Notation scientifique et préfixes
- Puissances de 10
- Changements d'unités
- Dimensions de différents objets

À travers la séquence, les compétences que l'on cherche à développer sont :

- a. Capacité à savoir exploiter l'information pour estimer, puis ordonner, grouper et représenter ces estimations (construction d'échelles qui deviennent ainsi des outils pour de nouvelles perspectives dans la capacité d'estimation).
- b. Maîtriser l'usage d'outils mathématiques (notation scientifique, proportionnalité et comparaison des grandeurs impliquées).
- c. Acquérir un bagage de culture scientifique qui devient un savoir fluide et actif à travers les compétences évoquées ci-dessus.

Ainsi il semble bien que les objectifs de la séquence proposée soient en bonne adéquation avec ceux des plans d'études de la 1^{ère} année du gymnase (Vaud) et du collège (Genève). Au-delà de ces exemples concrets, la séquence peut être utilisée le cas échéant sous une forme adaptée dans le cadre de plans d'études similaires. Le Tab. 2 présente une vue d'ensemble des classes où des séquences RSQ ont été testées.

Tab. 2. Expérimentations pratiques et évaluations des séquences RSQ avec le WE comme support ; la première est décrite dans Loretan et al. (2018a), la deuxième est le sujet de cet article.

Classes	N	Sujets	Lieux	Années
Classe pré-gymnasiale (11e HarmoS)	31	Masse volumique et poussée d'Archimède	CH (Vaud)	2015
Classes de seconde, Lycée	59	Les différentes sections de la séquence présentée ici	France (Anne-masse)	2016-17

2.4 Évaluation

Pour l'évaluation des apprentissages des élèves, et de l'efficacité des WE comme dispositif didactique, (a) un test (questionnaire à choix multiple, Tableau 6 en annexe) visant plusieurs compétences fondamentales pour le RSQ a été développé. Il est divisé en quatre parties, proposant des questions sur : (i) les compétences numériques et techniques, telles que les opérations avec des puissances de 10, les estimations, etc. (ii) les échelles spatiales, connaissance de grandeurs diverses (taille de la cellule, du rayon de la Terre, de la distance Soleil-Terre, etc.) (iii) les échelles temporelles comme le temps géologique (« deep time »), le temps nécessaire à la lumière émise par le Soleil pour rejoindre notre planète, etc. ; (iv) les unités diverses. Ce test de connaissances fondamentales, utilisé en pré et post test, est complété par (b) des tâches concernant le RSQ ; (i) de type conceptuelles et techniques (en pré et post,

⁵Classification internationale : selon le « International Standard Classification of Education » (ISCED) il s'agit des classes au niveau 3.4.4. (« upper secondary level, leading to direct access to tertiary education »; UNESCO, 2011). Le type de cours « discipline fondamentale » est défini par « basic subjects which all pupils have to complete » (comme opposé à « elective section consisting of a specialised subject ») ; Eurydice, 2021)

⁶L'esprit critique est une compétence autant qu'une attitude (Abrami et al. 2015, Viennot & Décamp, 2020)

Tab. 3) et (ii) de tâches sous forme de problèmes visant le transfert proche, puis le transfert lointain (uniquement en

Tâches techniques	Tâches conceptuelles
a) Transforme en mètre et exprime ta réponse en notation scientifique : $83\mu\text{m} =$ b) Donne le résultat des deux calculs ci-dessous en notation scientifique : $4 \cdot 10^6 \cdot 3.3 \cdot 10^{-7} \cdot 6 \cdot 10^3 =$ $153 \cdot 10^4 + 70 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^5 =$	Donne un objet ou alors une distance séparant deux objets pour chacune des longueurs ci-dessous (tâche prise de Tretter, Jones, & Mongue (2006)) : 1 mètre = 1 millimètre = 1 micromètre = 1 nanomètre = 10 mètres = 1 kilomètre = 1 000 000 mètres = 1 000 000 000 mètres =

post,

Tab. 4).

Tab. 3. Exemples de tâches techniques et conceptuelles

Tâches techniques	Tâches conceptuelles
a) Transforme en mètre et exprime ta réponse en notation scientifique : $83\mu\text{m} =$ b) Donne le résultat des deux calculs ci-dessous en notation scientifique : $\frac{4 \cdot 10^6 \cdot 3.3 \cdot 10^{-7}}{6 \cdot 10^3} =$ $153 \cdot 10^4 + 70 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^5 =$	Donne un objet ou alors une distance séparant deux objets pour chacune des longueurs ci-dessous (tâche prise de Tretter, Jones, & Mongue (2006)) : 1 mètre = 1 millimètre = 1 micromètre = 1 nanomètre = 10 mètres = 1 kilomètre = 1 000 000 mètres = 1 000 000 000 mètres =

Tab. 4. Exemples de tâches visant le transfert proche et lointain

Tâches techniques et conceptuelles (transfert proche)	Tâches techniques et conceptuelles (transfert lointain)
Si toute l'histoire de la Terre (environ 5 milliards d'années) était représentée par une horloge de 24h (apparition de la Terre à 0h) à quelle heure les Hommes apparaîtraient si les premiers signes du genre Homo, date d'environ 7 millions d'années ?	En 2016, la dette française a été estimée à environ 2000 milliards d'Euros, j'imagine que peu d'habitants de l'Hexagone ont une perception réelle de ce que cette somme gigantesque représente. En tant que jeune scientifique en herbe, saurais-tu donner du sens à cette somme afin de la rendre compréhensible par tout le monde ?

Les résultats obtenus, par comparaison des données en pré et post test d'un groupe test et de contrôle, sont prometteurs et vont en faveur de l'usage du WE pour l'apprentissage du RSQ : comme la Fig. 6 le montre, l'acquisition de toutes les compétences mentionnées est supérieure chez les élèves qui apprennent avec les WE et ceci (à une exception près) par des facteurs supérieurs 2. Ces résultats quantitatifs sont en accord avec des données qualitatives récoltées sous forme de constats d'élèves sur leur apprentissages (par exemple : « *Excellent, j'arrive pour une fois à faire un problème ! Je ressens même une idée de réponse avant même de commencer.* » (Loretan et al. (2018a) pour une analyse plus détaillée). D'autres résultats étayant l'efficacité de l'approche concernent le transfert à une discipline comme la biologie ou encore la compréhension de la nature des sciences sont présentés dans le chapitre conclusion et perspectives de cet article. Une présentation et discussion détaillée de l'étude peut être trouvée dans Loretan et al (2018c) et Loretan (2021).

3 Conclusions et perspectives

Les expérimentations pratiques et l'évaluation montrent que la séquence parvient à réaliser son objectif d'une double autonomisation des élèves. Premièrement, les élèves acquièrent un outil mathématique puissant, le raisonnement semi-quantitatif et le raisonnement par ordre de grandeur. Deuxièmement, cet outil leur permet de découvrir par eux-mêmes

des réponses à des questions qui peuvent éveiller leur curiosité et leur intérêt, souvent socialement pertinentes, aboutissant à des résultats intéressants et parfois surprenants. L'objectif central est donc l'instauration d'une attitude intellectuelle active et critique chez nos élèves, afin de surpasser l'approche de simplement croire et absorber les paroles de leur enseignant, des autorités, des médias, ou d'autres sources. Ceci peut être considéré comme élément important de la culture scientifique et numérique (Swiss HARMOS Sciences (CDIP, 2011), ou « Project 2061:

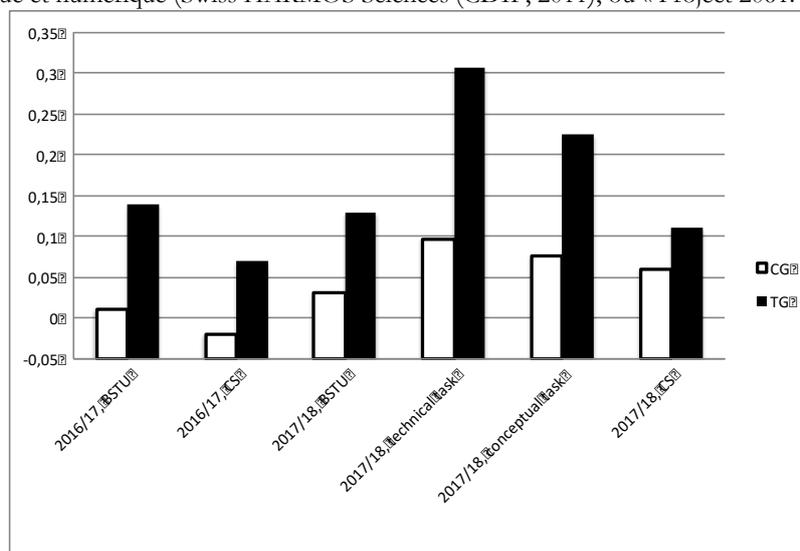


Fig. 6. Comparaison des gains du groupe de traitement (TG) avec le groupe de contrôle (CG) pour plusieurs compétences et sur deux volées ; axe x : BSTU, regroupe 'opérations de base', 'échelles spatiales et temporelles', 'unités' ; CS : connaissances scientifiques ; axe y : résultats pour la compétence en question, en « proportion du maximum possible » (POMP, Cohen et al, 1999).

Science for all Americans» de l'American Association for the Advancement of Science (AAAS, 1989). Cependant, nous avons observé quelques limites à l'efficacité du WE, notamment lors de la phase de transfert lointain. En effet, les premiers résultats d'analyse quantitative qui seront publiés prochainement présentent des valeurs moins significatives pour le transfert lointain que pour le transfert proche. D'un point de vue qualitatif on constate lors des corrections que l'élève ayant eu une approche d'apprentissage construite sur le WE est souvent trop attaché aux différentes étapes du WE et essaye coûte que coûte de les reproduire à l'identique, sans tenir compte des variantes des nouveaux problèmes. Néanmoins, les résultats d'analyse quantitatives permettent tout de même de constater que les WE encouragent le transfert de l'apprentissage, avec des tailles d'effets moyen à grands.

Dans la perspective d'élargir notre exploration autour du RSQ, le projet s'est également intéressé à l'impact de son apprentissage sur le transfert proche et lointain dans d'autres disciplines telle que la biologie, ou encore comme élément de la compréhension de la « Nature de la Science » (« Nature of Science », NoS). En effet, la biologie du XXIème siècle étant devenue une discipline fortement quantitative (NRC, 2009), il est essentiel que les enseignants puissent offrir à leurs élèves davantage d'opportunités de développer des attitudes quantitatives leur donnant des résultats à analyser plutôt que de simplement délivrer du contenu (Speth et. al, 2010, Hester et al., 2013). La NoS (Nature of Science), quant à elle, nous intéresse pour deux raisons : (i) pour la grande importance de l'approximation, de l'estimation, et des ordres de grandeurs pour les sciences en général, et la physique en particulier (voir « Introduction »), qui a attiré aussi l'attention des historiens et philosophes des sciences (Scriven, 1961 ; Martinez, 2020). D'une façon très pointue, Bertrand Russel (1931) dit « All exact science is dominated by the idea of approximation ». Il est clair qu'un tel élément clé pour les sciences devrait aussi être pris en compte pour le traitement de la NoS en didactique des sciences. (ii) car dans la définition de la NoS, à savoir un ensemble de connaissances, procédures et méthodes auxquelles s'ajoute une façon critique et réflexive de penser, on reconnaît tout ce qui a été mis en avance au sein du RSQ. Dans ce sens, le RSQ est un paradigme des objectifs didactiques liés à la NoS.

En résumé, avec la séquence d'enseignement développée documentées dans ce RBRP, la mise en évidence de la place occupée par le RSQ en sciences (Loretan et al., 2018b), les résultats des études qualitative et quantitative (Loretan, et al., 2018a ; Loretan et al., 2018c ; Loretan, 2021), nous pensons que le RSQ et le ROG avec le « worked exemple » comme support peut être considéré comme une approche utile et pertinente pour l'enseignement offrant des perspectives intéressantes pour la recherche en didactique des sciences.

References

- Angell, C., Guttersrud, Ø., Henriksen, E. K., & Isnes, A. (2004). Physics: Frightful, But Fun. Pupils' and Teachers' Views of Physics and Physics Teaching. *Science Education*, 88(5), 683–706. <https://doi.org/10.1002/sce.10141>
- Baur, A. (2018). Fehler, Fehlkonzepte und spezifische Vorgehensweisen von Schülerinnen und Schülern beim Experimentieren: Ergebnisse einer videogestützten Beobachtung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 24(1), 115–129. <https://doi.org/10.1007/s40573-018-0078-7>
- Bennett, J., & Hogarth, S. (2009). Would YOU want to talk to a scientist at a party? High school students' attitudes to school science and to science. *International Journal of Science Education*, 31(14), 1975–1998. <https://doi.org/10.1080/09500690802425581>
- Blum, W., & Ferri, R. B. (2009). Mathematical Modelling: Can It Be Taught And Learnt?. *Journal of Mathematical Modelling and Application*, 1(1), 45–58.
- Brandenburger, M. (2016). *Was beeinflusst den Erfolg beim Problemlösen in der Physik? Eine Untersuchung mit Studierenden*. Logos.
- Burde, J., Dopatka, L., Spatz, V., Hopf, M., Wilhelm, T., Schubatzky, T., Haagen-Schützenhöfer, C., & Ivanjek, L. (2020). Ein kontextstrukturiertes Unterrichtskonzept mit Potenzial. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, 1. Abgerufen am 09.12.2020 von <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/1041>.
- Dörner, D. (2006). Sprache und Denken. In J. Funke (Hrsg.), *Denken und Problemlösen* (S. 619–643). Verlag für Psychologie.
- Dorsch, A. V. (2013). *Die Wirkung von Kontexten in Physikkompetenztestaufgaben*. Logos.
- Eilam, B. (2002). Strata of comprehending ecology: Looking through the prism of feeding relations. *Science Education*, 86(5), 645–671.
- Euler, M. (1982). *Physikunterricht - Anspruch und Realität*. Lang.
- Fareed, B. & Winkelmann, J. (2019). Schülerwahrnehmung von Schwierigkeit des Physikunterrichts und der kognitiven Aktivierung durch die Lehrkraft. In H. Grötzebauch & V. Nordmeier (Hrsg.), *PhyDid B – Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung des Fachverbands Didaktik der Physik in Aachen 2019*, S. 167–169.
- Ford, K. W. (1989). Is physics difficult? *American Journal of Physics*, 57(10), 871–872. <https://doi.org/10.1119/1.15837>
- Freese, M. (2019). *Diagnose schwierigkeitserzeugender Merkmale anhand physikalischer Problemstellungen*. Wissenschaftliche Hausarbeit im Rahmen des Ersten Staatsexamens. Institut für Didaktik der Physik, Universität Frankfurt. Zuletzt aufgerufen am 8.10.2021: https://ae73f99a-a3b5-4ced-a8ad-a4834582020b.filesusr.com/ugd/9625d5_060d39946bc840a0b0ae81cd151d55bb.pdf
- Fruböse, C. (2010). Der ungeliebte Physikunterricht. Ein Blick in die Fachliteratur und einige Anmerkungen aus der Praxis. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 63(7), 388–392.
- Gilbert, J. K., & Justi, R. (2016). *Modelling-based Teaching in Science Education*. Springer.
- Gingras, Y. (2001). What did mathematics do to physics? *History of Science*, 39(4), 383–416. <https://doi.org/10.1177/007327530103900401>
- Gut-Glanzmann, C. & Mayer, J. (2018). Experimentelle Kompetenz. In D. Krüger, I. Parchmann, & H. Schecker (Hrsg.), *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 121–140). Springer.
- Hahn, S., & Prediger, S. (2008). Bestand und Änderung – Ein Beitrag zur didaktischen Rekonstruktion der Analysis. *Journal für Mathematikdidaktik*, 29, 163–198.
- Heering, P. & Kremer, K. (2018). Nature of Science. In D. Krüger, I. Parchmann, & H. Schecker (Hrsg.), *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 105–119). Springer.
- Heinze, A. (2002). „...aber ein Quadrat ist kein Rechteck“ – Schülerschwierigkeiten beim Verwenden einfacher geometrischer Begriffe in Jahrgang 8. *Zentralblatt für Didaktik der Mathematik*, 34(2), 51–55.
- Herbst, M., Fürtbauer, E.-M. & Strahl, A. (2016). Interesse an Physik - in Salzburg. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, Zuletzt aufgerufen am 09.12.2020 von <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/682/838>
- Hoffmann, L., Häußler, P. & Lehrke, M. (1998). *Die IPN-Interessenstudie Physik*. Kiel: IPN.
- Hoffmann, L. & Lehrke, M. (1986). Eine Untersuchung über Schülerinteressen an Physik und Technik. *Zeitschrift für Pädagogik*, 32(2), 189–204.
- Höttecke, D. & Rieß, F. (2015). Naturwissenschaftliches Experimentieren im Lichte der jüngeren Wissenschaftsforschung – Auf der Suche nach einem authentischen Experimentbegriff der Fachdidaktik. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 21(1), 127–139. <https://doi.org/10.1007/s40573-015-0030-z>
- Institut für Jugendforschung (2004). *Meinungen und Einstellungen von Schülern zum Thema Chemie*. IJF.
- Jung, W. (1995). Hat der Physikunterricht eine Zukunft? Überlegungen zum Verhältnis von Physik und Technik. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 1(1), 5–14.
- Kechel, J.-H. (2016). *Schülerschwierigkeiten beim eigenständigen Experimentieren: eine qualitative Studie am Beispiel einer Experimentieraufgabe zum Hooke'schen Gesetz*. Logos.
- Kechel, J.-H. & Wodzinski, R. (2016). Schülerschwierigkeiten beim Experimentieren zum Hooke'schen Gesetz. In C. Maurer (Hrsg.), *Authentizität und Lernen – das Fach in der Fachdidaktik*. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Berlin 2015. (S. 170–173). Universität Regensburg.

- KMK (2005). *Bildungsstandards im Fach Physik für den mittleren Schulabschluss: Beschluss vom 16.12.2004*. München, Neuwied: Luchterhand.
- KMK (2020). *Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife: Beschluss vom 18.06.2020*. Zuletzt aufgerufen am 26.8.2021: https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2020/2020_06_18-BildungsstandardsAHR_Physik.pdf
- Konrad, K. (2010). Lautes Denken. In G. Mey & K. Mruck (Hrsg.), *Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie* (S. 476–490). VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Kuhn, J. & Müller, A. (2014). Context-based science education by newspaper story problems: A study on motivation and learning effects. *Perspectives in Science*, 2(1-4), 5–21. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2014.06.001>
- Lehner, M. (2012). *Didaktische Reduktion*. Haupt.
- Leisen, J. (1998). Sprache(n) im Physikunterricht. *Praxis der Naturwissenschaften – Physik*, 47(2), 2–4.
- Leisen, J. (2005). Wechsel der Darstellungsformen – Eine wichtige Strategie im kommunikativen Physikunterricht. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 16, 10–11.
- Leisen (2010). Problemorientierter Unterricht und Aufgabenkultur. In S. Mikelskis-Seifert & T. Rabe (Hrsg.), *Physik-Methodik: Handbuch für die Sekundarstufe I und II* (2. Aufl., S. 82-94). Cornelsen.
- Löffler, P. & Kauertz, A. (2021). Kontext und Problemlösen. Eine Prozessanalyse. *Progress in Science Education* (4)1, 36–45. <https://DOI.10.25321/prise.2021.1051>
- Mayring, P. (2015). *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken*. 12., überarbeitete Auflage. Beltz.
- Meinhardt, C., Rabe, T. & Krey, O. (2018). Formulierung eines evidenzbasierten Validitätsarguments am Beispiel der Erfassung physikdidaktischer Selbstwirksamkeitserwartungen mit einem neu entwickelten Instrument. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 24(1), 131–150. <https://doi.org/10.1007/s40573-018-0079-6>
- Meisert, A. (2008). Vom Modellwissen zum Modellverständnis. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 14, 245–261.
- Merzyn, G. (2008). *Naturwissenschaften, Mathematik, Technik – immer unbeliebter? Die Konkurrenz von Schulfächern um das Interesse der Jugend im Spiegel vielfältiger Untersuchungen*. Schneider Verlag Hohengehren.
- Merzyn, G. (2010). Physik – ein schwieriges Fach? *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, 59(5), 9–12.
- Mey, G. & Mruck, K. (2010). Interviews. In G. Mey & K. Mruck (Hrsg.), *Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie* (S. 423–435). VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Mikelskis, H. F. (2010). Physikunterricht als Beitrag zur Bewältigung gesellschaftlicher Schlüsselprobleme. In H.F. Mikelskis (Hrsg.), *Physik-Didaktik: Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II* (2. Auflage, S. 11–38). Cornelsen.
- Mikelskis-Seifert, S. & Leisner, A. (2003). Das Denken in Modellen fördern. Ein Unterrichtsbeispiel zur Entwicklung von Teilchenvorstellungen. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 14(74), 32–34.
- Muckenfuß, H. (2006). *Lernen im sinnstiftenden Kontext: Entwurf einer zeitgemäßen Didaktik des Physikunterrichts* (1. Aufl., 2. Dr). Cornelsen.
- Nentwig, P., & Waddington, D. (Hrsg.). (2005). *Context based learning of science*. Waxmann.
- Nielsen, H. & Thomsen, P. V. (1985). Physics in upper secondary schools in Denmark. *European Journal of Science Education*, 7(1), 95–106. <https://doi.org/10.1080/0140528850070110>
- OECD (2014). *PISA 2012 Results (Volume V). Creative Problem Solving: Students' Skills in Tackling Real-Life Problems*. OECD Publishing.
- OECD. (2019). *PISA 2018 Results (Volume I). What students know and can do*. OECD Publishing.
- Ornek, F., Robinson, W. R. & Haugan, M. P. (2008). What makes physics difficult? *International Journal of Environmental & Science Education* 3(1), 30–34.
- Parchmann, I., & Kuhn, J. (2018). Lernen im Kontext. In D. Krüger, I. Parchmann, & H. Schecker (Hrsg.), *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 193–207). Springer.
- Podschuweit, S. & Bernholt, S. (2017). Composition-effects of context-based learning opportunities on students' understanding of energy. *Research in Science Education* 48(4), 717–752. <https://doi.org/10.1007/s11165-016-9585-z>
- Pospiech, G., Uhden, O. & Geyer, M.-A. (2015). Modell der mathematischen Modellierung in der Physik. In S. Bernholt (Hrsg.), *Heterogenität und Diversität – Vielfalt der Voraussetzungen im naturwissenschaftlichen Unterricht*. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Bremen 2014 (S. 199–201). IPN.
- Pozas, M., Löffler, P., Schnotz, W., & Kauertz, A. (2020). The Effects of Context-based Problem-solving Tasks on Students' Interest and Metacognitive Experiences. *Open Education Studies* 2(1), 112–125. <https://doi.org/10.1515/edu-2020-0118>
- Rabe, T. (2019). Identitätsaushandlungen zu Physik als Aspekt naturwissenschaftlicher (Grund)Bildung? In C. Maurer (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe*. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Kiel 2018 (S. 25–39). Universität Regensburg.
- Reit, X.-R., & Schäfer, M. (2020). An Analysis of Learners' Solution Strategies in the Context of Modelling Tasks. *Journal on Mathematics Education*, 11(3), 501-512.
- Rincke, K. (2011). It's Rather like Learning a Language: Development of talk and conceptual understanding in mechanics lessons. *International Journal of Science Education*, 33(2), 229–258. <https://doi.org/10.1080/09500691003615343>
- Rincke, K., & Markic, S. (2018). Sprache und das Lernen von Naturwissenschaften. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 31–48). Springer.

- Sharp, C., Hutchinson, D. & Davis, C. (1996). *The Take-up of Advanced Mathematics and Science Courses*. School Curriculum and Assessment Authority.
- Schwichow, M., & Nehring, A. (2018). Variablenkontrolle beim Experimentieren in Biologie, Chemie und Physik: Höhere Kompetenzzusprägungen bei der Anwendung der Variablenkontrollstrategie durch höheres Fachwissen? Empirische Belege aus zwei Studien. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 24(1), 217–233. <https://doi.org/10.1007/s40573-018-0085-8>
- Shemwell, J. T. & Capps, D. (2019). Learning Abstraction as a Model Competence. In A. Upmeyer zu Belzen, D. Krüger & J. van Driel (Hrsg.), *Towards a Competence-Based View on Models and Modeling in Science Education* (S. 291–307). Springer Nature.
- Spiegel, R. (2008). Zur Beziehung zwischen Physik und Technik. *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, 57(4), 10–13.
- Strömmer, T. (2020). *Fachspezifische Merkmale und ihr Zusammenhang mit der (Un-) Beliebtheit von Physikunterricht*. Wissenschaftliche Hausarbeit im Rahmen des Ersten Staatsexamens. Institut für Didaktik der Physik, Universität Frankfurt. Zuletzt aufgerufen am 8.10.2021: https://ae73f99a-a3b5-4ced-a8ad-a4834582020b.filesusr.com/ugd/9625d5_52b18b5044524e64be1814b4bc9a9f97.pdf
- Sumfleth, E., & Fischler, H. (Hrsg.). Professionelle Kompetenzen von Lehrkräften der Chemie und Physik. *Studien zum Physik- und Chemielernen Bd. 200*. Berlin: Logos.
- Teichrow, A. & Erb, R. (2020). Von der Beobachtung zur Erkenntnis am Beispiel des Regenbogens - Lernen mit Modellen und Experimenten. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 73(6), 481–486.
- Tesch, M. (2005). *Das Experiment im Physikunterricht: Didaktische Konzepte und Ergebnisse einer Videostudie*. Logos.
- Uhden, O. (2016). Verständnisprobleme von Schülerinnen und Schülern beim Verbinden von Physik und Mathematik. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 22(1), 13–24. <https://doi.org/10.1007/s40573-015-0038-4>
- Williams, C., Stanisstreet, M., Spall, K., Boyes, E., & Dickson, D. (2003). Why aren't secondary students interested in physics? *Physics Education*, 38(4), 324–329. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/38/4/306>
- Winkelmann, J. & Erb, R. (2018). Der Einfluss von Schüler- und Demonstrationsexperimenten auf den Lernzuwachs in Physik. *PhyDid A - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 17(1), S. 21-33.
- Winkelmann, J. (2019). Idealisierungen und Modelle im Physikunterricht. In H. Grötzebauch & V. Nordmeier (Hrsg.), *PhyDid B – Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung des Fachverbands Didaktik der Physik in Aachen 2019*, S. 227-231.
- Winkelmann, J. (2021). On Idealizations and Models in Science Education. *Science & Education*. <https://doi.org/10.1007/s11191-021-00291-2>
- Wodzinski, R., 2013. Lernen mit gestuften Hilfen. *Physik Journal*, 12, 45–49.
- Wodzinski, R., & Heinicke, S. (2018). Sprachbildung im Physikunterricht: Unterricht gestalten zwischen Fachsprache, Bildungssprache und Sprachförderung. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 165/166 (29), 4–11.
- Woitkowski, D., & Reinhold, P. (2018). Strategien und Probleme im Umgang mit Übungsaufgaben: Pilotergebnisse einer Interviewstudie im ersten Semester Physik. In C. Maurer (Hrsg.), *Qualitätsvoller Chemie- und Physikunterricht - normative und empirische Dimensionen* (S. 726–729). Universität Regensburg.