

ARTICLE INFO

Received	09 September 2025
Revised	15 October 2025
Accepted	17 October 2025
Published	30 December 2025

SISTEMI INNOVATIVI PER LO STOCCAGGIO DELL'IDROGENO (HEHS)

Visual design e AI per la comunità

INNOVATIVE SYSTEMS FOR HYDROGEN STORAGE (HEHS)

Visual design and AI for community engagement

Fabio Bianconi, Marco Filippucci, Federico Rossi, Michela Meschini

ABSTRACT

Il progetto High Efficiency Hydrogen Storage (HEHS) si inserisce nel quadro della transizione ecologica, proponendo un sistema innovativo per lo stoccaggio dell'idrogeno basato su clatrati idrati. Il contributo affronta la dimensione visiva della transizione con l'obiettivo di proporre una codifica cromatica dell'idrogeno alternativa alla Hydrogen Colour Classification, oggi diffusa ma priva di basi percettive e teoriche condivise. La metodologia adottata integra teoria del colore, analisi delle identità visive esistenti e validazione percettiva tramite simulazione basata sui Large Language Models, modellando profili utente differenziati. La ricerca mira a costruire un linguaggio visivo accessibile, coerente e trasferibile, capace di restituire la complessità dei processi energetici e rafforzare la sostenibilità cognitiva delle comunicazioni ambientali.

The High Efficiency Hydrogen Storage (HEHS) project is part of the broader framework of ecological transition, proposing an innovative hydrogen storage system based on hydrate clathrates. The contribution addresses the visual dimension of the transition, with the aim of defining a chromatic code for hydrogen as an alternative to the current Hydrogen Colour Classification, which, although widespread, lacks shared perceptual and theoretical foundations. The adopted methodology integrates colour theory, the analysis of existing visual identities, and perceptual validation through simulation based on Large Language Models, modelling differentiated user profiles. The research aims to develop an accessible, coherent, and transferable visual language that can effectively express the complexity of energy processes and enhance the cognitive sustainability of environmental communication.

KEYWORDS

stoccaggio dell'idrogeno ad alta efficienza, progettazione visiva, classificazione del colore dell'idrogeno, intelligenza artificiale, transizione sostenibile

high-efficiency hydrogen storage, visual design, hydrogen color classification, artificial intelligence, sustainable transition

Fabio Bianconi, Engineer, PhD, is a Full Professor of Drawing at the University of Perugia (Italy), where he focuses on architectural drawing, landscape representation, and digital innovation. E-mail: fabio.bianconi@unipg.it

Marco Filippucci, Engineer, PhD, is an Associate Professor of Drawing at the University of Perugia (Italy). His research interests include representation, perception, landscape, and digital techniques. He is the Scientific Coordinator of national and international research projects. E-mail: marco.filippucci@unipg.it

Federico Rossi, Engineer, PhD, is a Full Professor of Environmental Technical Physics at the University of Perugia (Italy). His research focuses on hydrogen, renewable energy, climate change, gas hydrates, and energy efficiency. E-mail: federico.rossi@unipg.it

Michela Meschini, Engineer, Architect, PhD, is an Assistant Professor of Drawing at the University of Perugia (Italy). Her research activity concerns architectural drawing, digital representation, surveying, and BIM, with particular attention to the built heritage. E-mail: michela.meschini@unipg.it



■ Nel panorama della transizione ecologica l'idrogeno si configura come vettore strategico per la decarbonizzazione dei sistemi energetici, assumendo un ruolo centrale nelle agende politiche, nei piani industriali e nella ricerca scientifica (European Commission, 2019, 2021b; IEA, 2019; IPCC, 2023; Vivanco-Martin and Iranzo, 2023). La sua capacità di integrarsi nei settori hard-to-abate lo rende essenziale per il raggiungimento della neutralità climatica come delineato nel Green Deal Europeo, nel pacchetto Fit for 55 e nel Piano REPowerEU (European Commission, 2019, 2021a, 2022). In Italia il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE, 2023a), la Strategia Nazionale per l'Idrogeno (MISE, 2020) e il PNRR (Governo Italiano, 2023) promuovono la realizzazione di hydrogen valley e l'adozione di tecnologie avanzate (Battisti and Calvano, 2024), anche attraverso strumenti regolatori quali le Direttive 2018/2001 e 2023/2413 (European Parliament and Council, 2018, 2023).

In questo contesto si colloca il progetto High Efficiency Hydrogen Storage (HEHS), finanziato con fondi PNRR¹, che propone un sistema innovativo di stoccaggio e trasporto dell'idrogeno basato sull'impiego di clatrati idrati. Queste strutture cristalline, capaci di intrappolare gas a basse pressioni e temperature moderate, rappresentano un'alternativa promettente rispetto alle tecnologie convenzionali in termini di efficienza, sicurezza e sostenibilità (Davoodabadi, Mahmoudi and Ghasemi, 2021; Veluswamy, Kumar and Linga, 2014; Di Giuseppe and Gambelli, 2024; Gambelli, Rossi and Gigliotti, 2024). La letteratura più recente ne sottolinea il potenziale supportato da evidenze sperimentali e da modelli predittivi applicati a miscele complesse in condizioni porose reali (Gambelli, Rossi and Gigliotti, 2025; Giampaoli et alii, 2025; Paltsev et alii, 2021).

La sperimentazione scientifica è affiancata da una struttura metodologica guidata dai dati, fondata su simulazioni termodinamiche e tecniche di machine learning (Jordan and Mitchell, 2015; Giampaoli et alii, 2025), ma anche su sistemi di validazione cognitiva, basati sull'uso di Large Language Models (LLM). Recenti studi hanno dimostrato come tali modelli siano in grado di replicare valutazioni coerenti con i paradigmi della percezione cromatica umana (Marjeh et alii, 2023), di simulare comportamenti psicologici complessi (Aher, Arriaga and Kalai, 2023) e di generare risposte comparabili a quelle di esperti umani (Binz and Schulz, 2023), aprendo nuove prospettive per l'analisi delle interazioni visive.

La transizione energetica richiede infatti anche una progettazione simbolica e culturale dei processi, capace di orientare la percezione pubblica e generare consenso informato: in questa prospettiva il colore è indagato come strumento attivo nella rappresentazione dell'idrogeno. Il contributo si propone di superare l'attuale Hydrogen Colour Classification, affetta da arbitrarietà semantiche, incoerenze percettive e mancanza di standard condivisi (Kusoglu, 2022; Ocenic, 2023) attraverso un modello di codifica cromatica fondato su criteri scientifici, percettivi e progettuali.

La proposta si basa su tre ipotesi: il colore è un codice semantico efficace nella comunicazione ambientale; la rappresentazione cromatica deve essere accessibile, coerente e riconoscibile; la validazione può avvenire tramite simulazioni LLM-based capaci di riprodurre differenti profili percettivi (Luo et alii, 2025; Aher, Arriaga and Kalai, 2023). Tali modelli offrono una struttura statistica capace di anticipare

pattern interpretativi, generare valutazioni controllabili e ampliare l'affidabilità dei sistemi visuali. Lo studio intende così dimostrare come la teoria del colore, integrata con l'intelligenza artificiale, possa costituire un dispositivo progettuale strategico per il coinvolgimento della comunità nella transizione verde, fornendo strumenti comunicativi robusti, scalabili e cognitivamente fondati.

Alla luce di queste premesse il contributo si propone di indagare il potenziale del colore come dispositivo cognitivo nella rappresentazione della transizione energetica, elaborando un modello di codifica visiva dell'idrogeno fondato su criteri teorici, percettivi e comunicativi. L'obiettivo è dimostrare la possibilità di integrare teoria del colore, sperimentazione scientifica e intelligenza artificiale in un framework progettuale capace di restituire la complessità dei processi energetici attraverso linguaggi accessibili e verificabili.

Il lavoro si articola in quattro passaggi: un inquadramento teorico sulla relazione tra transizione energetica e codici visivi; la descrizione del metodo di costruzione e validazione del modello cromatico; la presentazione dei risultati dell'indagine percettiva basata su profili simulati; infine la proposta di una nuova classificazione visiva dell'idrogeno fondata sull'intensità emissiva di CO₂. Per la sua natura interdisciplinare il contributo può offrire un impatto significativo nella comunità scientifica, proponendo un modello replicabile di comunicazione ambientale in grado di connettere conoscenza tecnica e cultura visiva all'interno dei processi di transizione ecologica.

Transizione energetica e codici visivi | La transizione energetica, oltre che rappresentare una sfida tecnologica, implica una trasformazione culturale che richiede nuovi linguaggi, sistemi simbolici e infrastrutture comunicative. In questo contesto la comunicazione visiva non è solo mezzo informativo, ma dispositivo epistemico e relazionale, capace di generare comprensione e coinvolgimento (Tufte, 2006; Ware, 2004; Valenti et alii, 2024). Il colore, in particolare, svolge un ruolo centrale come sistema cognitivo e semiotico (Albers, 1963; Itten, 1961; Bertin, 1983; Kress and van Leeuwen, 2020; Lupton, 2017), abilitando strutture percettive e significati condivisi. Negli studi più recenti la riflessione sul colore si è progressivamente estesa dall'ambito percettivo a quello cognitivo e comunicativo, configurandolo come dispositivo interpretativo della realtà visiva e culturale (Gage, 1999; Heller, 2009; Fairchild, 2013; Falcinelli, 2017): tali contributi hanno ridefinito il ruolo del colore come elemento di costruzione simbolica, in grado di integrare dimensioni estetiche, psicologiche e informative, offrendo nuovi strumenti per la rappresentazione dei processi complessi e per il design della comunicazione ambientale.

In questa prospettiva il Visual Design può configurarsi come strumento di sostenibilità cognitiva, coniugando accessibilità e rigore (Casiddu, Burlando and Chen, 2024; Valenti et alii, 2024; Zannoni et alii, 2024). La capacità del colore di costruire relazioni simboliche è oggi riconosciuta nella comunicazione ambientale e nei processi progettuali complessi. Nel caso dell'idrogeno la Hydrogen Colour Classification associa cromie a specifici processi produttivi; nata con finalità divulgative, tale classificazione è stata recepita in documenti istituzionali e strategie comunicative (IEA, 2021; Confindustria, 2021; Reitsma, 2023), assumendo un valore prescrittivo privo di fondamento teorico.

La letteratura ne ha evidenziato vari limiti: arbitrarietà percettiva (Kusoglu, 2022), mancanza di standard condivisi (Ocenic and Tanau, 2023), difficoltà nel rappresentare tecnologie ibride (Ajanovic, Sayer and Haas, 2022; Noussan et alii, 2021) e scarsa inclusività verso soluzioni emergenti (Chew et alii, 2023; Paltsev et alii, 2021): Boretti (2021) propone di ampliare la gamma cromatica, introducendo tonalità come il bianco per tecnologie come la pirolisi solare; in alternativa recenti studi suggeriscono modelli fondati su gradienti cromatici capaci di esprimere relazioni tra fonti energetiche e intensità emissive (Arcos and Santos, 2023; Vezzoni, 2024).

In tali approcci il colore assume una funzione interpretativa, diventando interfaccia cognitiva tra sistemi complessi e narrazione visiva (Bertin, 1983; Kress and van Leeuwen, 2020). La costruzione di linguaggi visivi accessibili si inserisce nei paradigmi della sostenibilità e dell'economia circolare, contribuendo alla ridefinizione qualitativa dello sviluppo (Capra and Luisi, 2014; Raworth, 2017; Sachs, 2019; Hickel, 2017): in questo quadro la comunicazione ambientale orienta comportamenti e rappresentazioni (Rawsthorn and Antonelli, 2022; Manzini, 2015).

In tale scenario è da collocarsi il progetto HEHS che rappresenta un caso studio in cui ricerca scientifica e comunicazione visiva si integrano in una sintassi cromatica armonica, validata empiricamente e replicabile: l'adozione di sistemi visivi basati su gradienti, accessibilità (W3C, 2025) e riconoscibilità percettiva contribuisce alla costruzione di un ecosistema simbolico per la transizione, come indicato anche nei documenti europei e nazionali (European Commission, 2021b; European Parliament and Council, 2023; MISE, 2020; MASE, 2023b; Confindustria, 2021).

Costruzione del modello cromatico | L'elaborazione di un sistema cromatico per la rappresentazione visiva dell'idrogeno è stata strutturata secondo una metodologia integrata che ha combinato l'analisi critica delle identità visive esistenti con la costruzione teorica di un repertorio armonico e la successiva validazione percettiva (Fig. 1). Il campione di partenza è costituito da diciannove casi studio selezionati a livello internazionale tra operatori, consorzi, Enti pubblici e aziende attive nella produzione, distribuzione e promozione dell'idrogeno (Figg. 2, 3). I loghi e i sistemi grafici associati a ciascun soggetto sono stati analizzati mediante estrazione diretta dei valori cromatici RGB e HSB con il supporto di strumenti vettoriali e software di lettura parametrica (Fig. 4).

Contestualmente è stata verificata la conformità delle combinazioni di colore rispetto ai criteri di contrasto previsti dalle linee guida WCAG 2.1, al fine di valutare il grado di accessibilità visiva in ottica comunicativa. L'analisi ha incluso anche componenti tipografiche, struttura compositiva, tecniche grafiche prevalenti, nonché la lettura semiotica dei segni impiegati, con riferimento alla teoria della percezione e della comunicazione visiva (Itten, 1961; Arcos and Santos, 2023).

Per la fase di validazione la ricerca ha adottato una metodologia di simulazione semantica controllata, fondata sull'impiego dei Large Language Models (LLM) per la generazione di profili utente: in luogo della somministrazione tradizionale a un campione reale, è stata costruita una popolazione artificiale composta da cinquanta persone simulate, modellate in funzione di variabili anagrafiche, cul-

turali e professionali. Tali profili sono stati calibrati per restituire la varietà tipologica di un’utenza potenziale, mantenendo coerenza interna tra ruolo, formazione, contesto e livello di alfabetizzazione visiva. Inoltre l’approccio seguito, dalla fase teorica alla validazione percettiva, configura un metodo sperimentale strutturato, impostato per garantire coerenza interna e possibilità di riuso in contesti analoghi.

I questionari, di tipo semistrutturato e a prevalenza descrittiva, sono stati articolati in cinque sezioni principali (Tab. 1) e sono stati somministrati ai profili simulati tramite interazione iterativa controllata, in cui il modello è stato guidato a rispondere secondo vincoli semantici, coerenze narrative e comportamenti plausibili. Questo ha consentito di esplorare scenari di risposta diversificati, rappresentativi di differenti livelli di sensibilità percettiva, competenza comunicativa e consapevolezza simbolica, senza incorrere nei limiti logistici e statistici tipici delle indagini reali.

Il processo ha generato dati articolati, con esiti convergenti in termini di preferenza cromatica, efficacia simbolica e riconoscibilità percettiva, che sono stati interpretati alla luce delle ipotesi di partenza e dei principi teorici assunti. L’adozione di una simulazione basata sull’LLM non ha inteso sostituire l’indagine empirica, bensì configurarsi come dispositivo esplorativo e riflessivo, coerente con un approccio etico alla progettazione comunicativa, in cui l’intelligenza artificiale opera come infrastruttura cognitiva in grado di supportare la generazione di scenari valutativi, ampliare l’orizzonte delle possibilità progettuali e testare la coerenza simbolica delle soluzioni in contesti differenziati.

Palette cromatiche ed esiti dell’indagine percettiva | A partire dalla sistematizzazione dei dati cro-

matici è stato costruito un repertorio di trentuno palette tipo, ciascuna composta da tre a cinque colori e organizzata in otto gruppi armonici da A ad H (Figg. 5-8): i primi quattro (A-D) seguono i canoni della teoria di Itten (monocromatico, analogo, complementare), mentre i gruppi E-H derivano da configurazioni ricorrenti nei sistemi visivi del settore energetico. Le palette sono state ricostruite in formato vettoriale, codificate e predisposte per la verifica percettiva mediante simulazione semantica controllata.

La validazione percettiva è stata condotta attraverso la simulazione di cinquanta profili, ottenuti mediante sistemi di LLM calibrati su variabili anagrafiche, formative e professionali. L’analisi delle risposte ha evidenziato un quadro di coerenza narrativa che consente di cogliere non solo le preferenze cromatiche generali, ma anche le motivazioni sottese alle scelte (Fig. 9). Dall’analisi emerge una chiara polarizzazione simbolica: il verde e il blu vengono ricondotti alla dimensione della sostenibilità ambientale e dell’innovazione tecnologica (Fig. 10).

Tale convergenza semantica, diffusa e trasversale rispetto ai diversi profili, conferma la pertinenza di queste tonalità come codici cromatici privilegiati nella comunicazione energetica. Accanto a questa prima evidenza, si registra una valutazione fortemente orientata verso le palette costruite secondo armonie che seguono le teorie del colore (Fig. 11), percepite come più leggibili, stabili e adeguate a contesti istituzionali. Le configurazioni non canoniche, pur riconosciute in alcuni casi come portatrici di originalità, sono state ritenute meno efficaci nella trasmissione immediata dei significati; ne deriva l’affermazione di un principio di continuità percettiva, in cui la solidità teorica della composizione cromatica si traduce in un più elevato grado di comprensione e di riconoscibilità.

La validazione finale ha evidenziato la netta preferenza per la palette ‘P22’ (48%), costruita su un gradiente verde-blu e coerente con la teoria del colore (Fig. 12); in seconda posizione la ‘P31’ (26%), confrontata come palette di carattere sperimentale. La forza di questa scelta non risiede unicamente nella gradevolezza estetica, ma soprattutto nella sua capacità di integrare in un continuum visivo i due poli simbolici centrali della transizione energetica: naturalità e tecnologia. Il gradiente verde-blu che la caratterizza è stato percepito come rappresentazione dinamica ed evolutiva, capace di narrare processi di trasformazione senza soluzione di continuità, in un equilibrio cromatico che unisce coerenza percettiva, armonia tonale e leggibilità funzionale in accordo con i criteri WCAG 2.1.

La validazione condotta tramite modelli linguistici LLM, pur offrendo un controllo semantico e narrativo elevato, riflette la dimensione di un esperimento simulato, costruito per restituire coerenza percettiva in condizioni controllate. Tale impostazione, per quanto efficace nel garantire replicabilità e trasparenza metodologica, si colloca entro un orizzonte di rappresentazione, più che di misurazione diretta dell’esperienza, e va quindi interpretata come strumento di esplorazione cognitiva. Allo stesso modo la selezione dei casi cromatici, derivata da criteri teorici e percettivi consolidati, risponde a un ambito applicativo circoscritto, quello della comunicazione visiva nel settore energetico, che potrà essere esteso e verificato in ulteriori contesti di sperimentazione.

L’applicazione del modello evidenzia infine alcune barriere di trasferibilità, legate alla diversa alfabetizzazione visiva, alla variabilità normativa e culturale dei contesti, che rappresentano al tempo stesso un limite e una potenziale area di sviluppo per la ricerca futura.

Superare la Hydrogen Colour Classification | I ri-

sultati emersi dall’indagine percettiva confermano, in modo articolato, la validità dell’assunto teorico da cui muove il progetto HEHS: la necessità di superare l’attuale sistema cromatico dell’idrogeno, rigido e convenzionale, in favore di un linguaggio visivo basato su continuità percettiva, coerenza simbolica e leggibilità semantica. Come evidenziato da numerosi studi recenti (Kusoglu, 2022; Ocenic, 2023; Chew et alii, 2023), l’Hydrogen Colour Classification presenta criticità sostanziali: assenza di uno standard condiviso, sovrapposizione tra cromie e processi produttivi, incoerenze teoriche e limiti nella rappresentazione di tecnologie ibride (Fig. 13).

L’approccio basato su etichette fisse appare inadatto a restituire la complessità dinamica della filiera e a sostenere la costruzione di un immaginario riconoscibile e condiviso. In questa direzione anche Boretti (2021) invita a includere nel repertorio cromatico nuove configurazioni tecnologiche oggi escluse dalle tassonomie ufficiali, rafforzando l’ur-



Fig. 1 | Methodology (credit: M. Meschini, 2025).

Fig. 2 | Case studies used in the research (credit: M. Meschini, 2025).

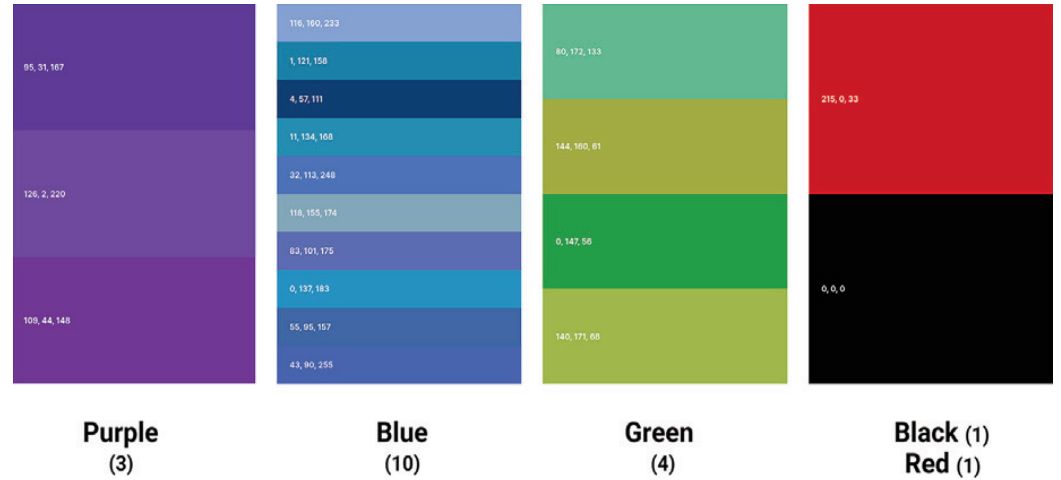
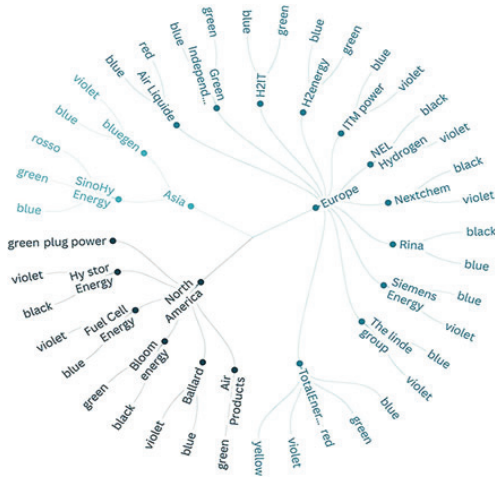


Fig. 3 | Radial map of the prevailing chromatisms in corporate logos operating in the hydrogen sector, classified by continent (credit: M. Meschini, 2025).

Fig. 4 | Main chromaticities extracted from the samples (credit: M. Meschini, 2025).

genza di una riformulazione epistemologicamente fondata. Le cinque tonalità selezionate, appartenenti allo stesso asse analogico blu-verde, possono essere reinterpretate come segmenti di un gradiente classificatorio in grado di rappresentare la complessità e la variabilità dei processi produttivi. La classificazione proposta organizza i cromatismi in una sequenza progressiva ordinata per intensità emissiva di CO₂, assumendo come parametro principale il grado di sostenibilità delle tecnologie di produzione dell'idrogeno (Fig. 14).

Il primo colore della palette (#8EA641) corrisponde al livello a CO₂ molto bassa o negativa, associato ai processi biochimici e alla conversione da biomassa; il secondo colore (#6B9D5C) rappresenta un livello a CO₂ quasi nulla, esemplificato dall'elettrolisi alimentata da fonti rinnovabili; il terzo colore (#489476) è riferito a un livello a CO₂ ridotta, tipico di soluzioni ibride low-carbon quali la pirolisi del metano; il quarto colore (#248B91) si colloca in corrispondenza di un livello a CO₂ medio-bassa, riconducibile allo steam reforming con cattura e stoccaggio della CO₂ (CCS); infine, il quinto colore (#0179AB) individua un livello a CO₂ elevata, rappresentativo delle tecnologie mature, ma ancora ad alta intensità emissiva, come lo steam reforming privo di sistemi di cattura.

Tale logica graduale consente di superare l'approccio segmentato, abilitando la rappresentazione visiva di zone liminari e traiettorie evolutive. Il colore non è più mera etichetta, ma sintassi visiva: sistema codificabile, interpretabile e adattivo, in grado di coniugare coerenza percettiva, fondatezza teorica (Itten, 1961) e potenzialità comunicative. La validazione empirica ne attesta l'efficacia, aprendo alla possibilità di costruire codici visivi condivisi attraverso processi progettuali che integrano scienza, design e rappresentazione.

Visione strategica: SDG e impatti trasversali | Il progetto HEHS si configura come dispositivo integrato capace di attivare sinergie multilivello all'interno dell'Agenda 2030 (UN, 2015), con particolare riferimento a quattro obiettivi cardine (Fig. 15). In primo luogo l'SDG 7 (energia pulita e accessibile) viene direttamente interpellato attraverso lo sviluppo di un sistema di stoccaggio dell'idrogeno ad alta efficienza, fondato su tecnologie innovative a ridotto impatto ambientale. L'adozione di clatrati idrati,

unitamente all'uso di modelli predittivi e simulazioni termodinamiche, orienta la ricerca verso soluzioni tecniche scalabili, sicure e sostenibili.

L'SDG 9 (industria, innovazione e infrastrutture) trova riscontro nella matrice del progetto guidata dai dati, che coniuga sperimentazione scientifica, digitalizzazione e trasferibilità industriale, promuovendo infrastrutture intelligenti e resilienti. Al contempo l'elaborazione di un codice cromatico armonico e verificabile in termini percettivi risponde ai principi dell'SDG 12 (produzione e consumo responsabili), ponendo la comunicazione visiva come leva per la trasparenza informativa, la responsabilizzazione degli attori e la diffusione di pratiche sostenibili. Infine l'intero impianto si orienta verso l'SDG 13 (azione per il clima), collocandosi in una visione sistemica della decarbonizzazione, che riconosce nella dimensione simbolica e narrativa un fattore abilitante della transizione.

Pur mantenendo una coerenza generale con gli obiettivi dell'Agenda 2030, il progetto HEHS evidenzia alcuni punti di bilanciamento tra obiettivi differenti. Il perseguimento dell'efficienza energetica (SDG 7) e dell'innovazione infrastrutturale (SDG 9) richiede infatti l'impiego di materiali e tecnologie avanzate che possono comportare impatti ambientali e costi di produzione superiori nelle fasi iniziali di sviluppo. Analogamente l'applicazione di un codice cromatico armonico orientato all'SDG 12 implica una mediazione tra rigore scientifico e accessibilità comunicativa, al fine di garantire una comprensione inclusiva senza ridurre la complessità informativa. Questi compromessi, più che rappresentare limiti, costituiscono elementi di consapevolezza progettuale che rafforzano la capacità del sistema di operare in modo responsabile e adattivo all'interno dei diversi ambiti dell'Agenda 2030.

Conclusioni | Il progetto HEHS, attraverso l'integrazione tra sperimentazione scientifica e progettazione comunicativa, ha generato un modello operativo in cui soluzioni tecniche e codici visivi convergono in una visione sistemica della transizione energetica. La validazione sperimentale della formazione di idrati in miscele ternarie H₂-CO₂-idrocarburi leggeri in condizioni porose (Di Giuseppe and Gambelli, 2024) e l'efficienza dello stoccaggio mediante clatrati con CO₂ / N₂ (Gambelli, Rossi and Gigliotti, 2024) confermano la trasferibilità del sistema HEHS in scenari

applicativi reali, garantendone affidabilità termodinamica e sostenibilità ambientale.

Parallelamente la costruzione di una palette cromatica fondata su criteri percettivi, armonie teoriche (Itten, 1961) e validazione basata sull'LLM, risponde all'urgenza di superare i limiti comunicativi dell'attuale Hydrogen Colour Classification (Kusoglu, 2022; Chew et alii, 2023). Il gradiente proposto introduce una sintassi cromatica continua e modulare, capace di rappresentare le traiettorie evolutive della filiera idrogeno in chiave non dicotomica ma relazionale. La classificazione visiva si emancipa dal paradigma prescrittivo dei codici-colore fissi, per configurarsi come sistema dinamico e semanticamente fondato.

Questa articolazione consente di connettere eterogeneità tecnologica e accessibilità cognitiva, offrendo un framework replicabile per la comunicazione ambientale. Il sistema può essere applicato a etichettature tecniche, interfacce informative, comunicazione istituzionale e progetti di eco-design, promuovendo un nuovo ruolo del Visual Design nei processi di sostenibilità. La centralità della dimensione cromatica, spesso relegata a funzione decorativa, emerge come fattore di senso e coesione simbolica in un contesto energetico complesso. In tale ottica la proposta contribuisce a delineare una prospettiva epistemologica alternativa, in cui la rappresentazione grafica non è mera traduzione di contenuti tecnici, ma forma di conoscenza che orienta percezioni, decisioni e comportamenti.

In the context of ecological transition, hydrogen is emerging as a strategic vector for the decarbonisation of energy systems, assuming a central role in political agendas, industrial strategies, and scientific research (European Commission, 2019, 2021b; IEA, 2019; IPCC, 2023; Vivanco-Martín and Irazo, 2023). Its capacity to integrate into hard-to-abate sectors makes it essential for achieving climate neutrality, as outlined in the European Green Deal, the Fit for 55 package, and the REPowerEU Plan (European Commission, 2019, 2021a, 2022). In Italy, the Ministry of the Environment and Energy Security (MASE, 2023a), the National Hydrogen Strategy (MISE, 2020) and the PNRR (Governo Italiano, 2023) promote the creation of hydrogen valleys and the adoption of advanced technologies (Battisti and Calvano, 2024),

also through regulatory instruments such as Directives 2018/2001 and 2023/2413 (European Parliament and Council, 2018, 2023).

Within this framework lies the High Efficiency Hydrogen Storage (HEHS) project, funded by the PN-RR programme, which proposes an innovative hydrogen storage and transport system based on hydrate clathrates. These crystalline structures, capable of trapping gases at low pressures and moderate temperatures, represent a promising alternative to conventional technologies in terms of efficiency, safety, and sustainability (Davoodabadi, Mahmoudi and Ghasemi, 2021; Veluswamy, Kumar and Linga, 2014; Di Giuseppe and Gambelli, 2024; Gambelli, Rossi and Gigliotti, 2024). The most recent literature highlights their potential, supported by experimental evidence and predictive models applied to complex mixtures under real porous conditions (Gambelli, Rossi and Gigliotti, 2025; Giampaoli et alii, 2025; Paltsev et alii, 2021).

Scientific experimentation is supported by a data-driven methodological framework based on ther-

modynamic simulations and machine learning techniques (Jordan and Mitchell, 2015; Giampaoli et alii, 2025), as well as on cognitive validation systems employing Large Language Models (LLMs). Recent studies have shown that such models are capable of replicating evaluations consistent with human colour perception paradigms (Marjeh et alii, 2023), simulating complex psychological behaviours (Aher, Ariaga and Kalai, 2023), and generating responses comparable to those of human experts (Binz and Schulz, 2023), thereby opening new perspectives for the analysis of visual interactions.

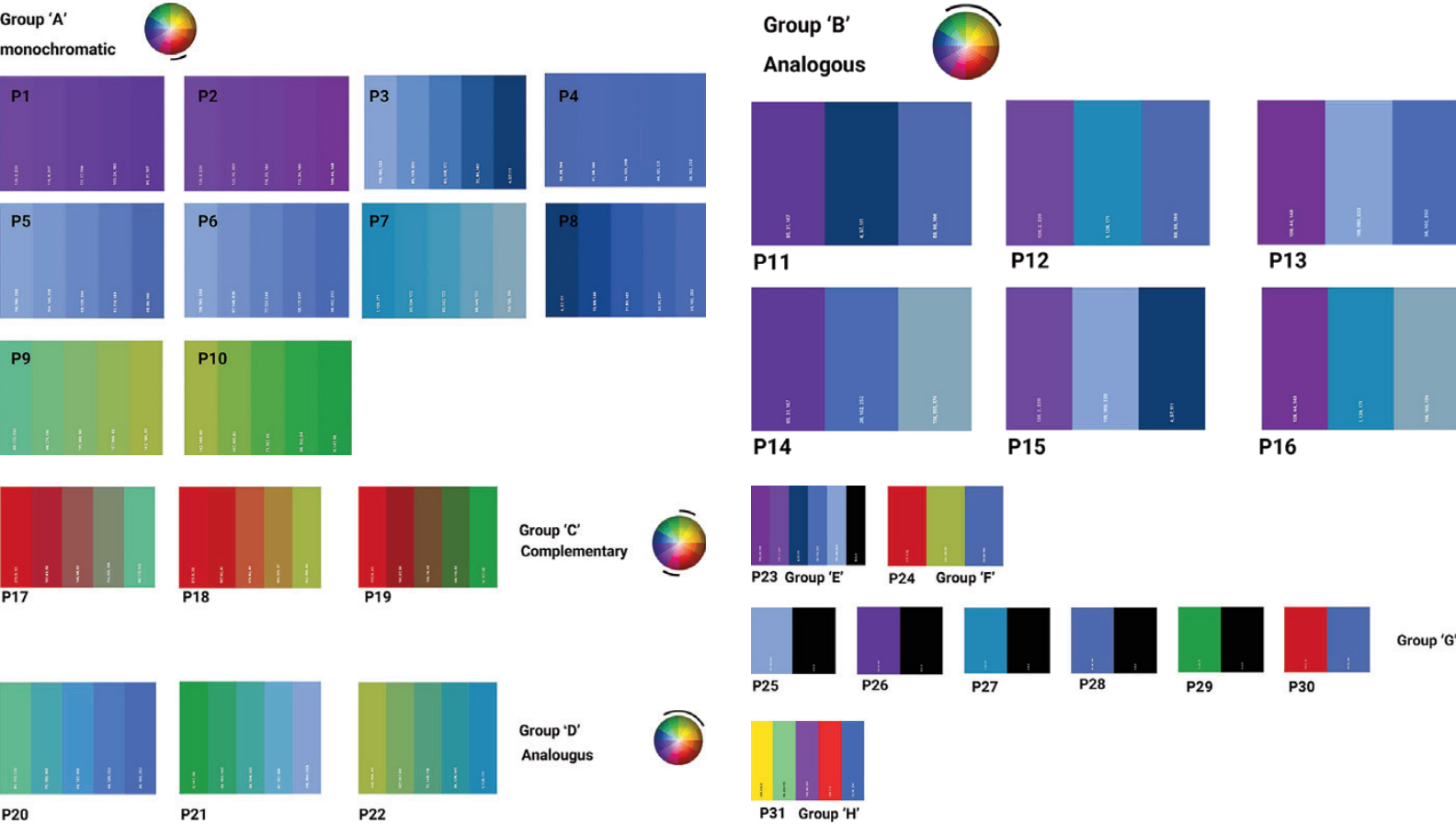
The energy transition also requires a symbolic and cultural design of processes that can guide public perception and foster informed consensus. In this perspective, colour is explored as an active tool for representing hydrogen. The paper aims to overtake the current Hydrogen Colour Classification, affected by semantic arbitrariness, perceptual inconsistencies, and a lack of shared standards (Kusoglu, 2022; Ocenic, 2023), by proposing a chromatic coding model grounded in scientific, perceptual, and design

criteria. The proposal is based on three hypotheses: colour functions as an effective semantic code in environmental communication; chromatic representation must be accessible, coherent, and recognisable; validation can be conducted through LLM-based simulations capable of reproducing differentiated perceptual profiles (Luo et alii, 2025; Aher, Ariaga and Kalai, 2023). Such models provide a statistical framework for anticipating interpretative patterns, conducting controlled evaluations, and enhancing the reliability of visual systems. The study therefore seeks to demonstrate how colour theory, integrated with artificial intelligence, can serve as a strategic design device for community engagement in the green transition, providing robust, scalable, and cognitively grounded communication tools.

In light of these premises, the contribution investigates the potential of colour as a cognitive device in representing energy transition, developing a visual coding model for hydrogen based on theoretical, perceptual, and communicative criteria. The objective is to demonstrate the possibility of integrating

Section	Objective	Type of response
1 Chromatic association	To analyse the semantic relationships between colour and the concepts of sustainability and innovation	Multiple choice
2 Harmonic preference	To assess the tendency towards palettes based on colour theory or experimental solutions	Single choice
3 Visual identity	To identify the palette perceived as most representative for hydrogen-related brand communication	Single choice
4 Gradient interpretation	To explore the perception of the green-blue gradient and its coherence with the values of the energy transition	Short descriptive response
5 Overall feedback	To collect general opinions on the communicative effectiveness of the proposed chromatic model	Open-ended

Tab. 1 | Structure and typology of the perceptual questionnaire (credit: the Authors, 2025).



Figg. 5-8 | Palettes used in the survey (credits: M. Meschini, 2025).

colour theory, scientific experimentation, and artificial intelligence within a design framework capable of conveying the complexity of energy processes through accessible and verifiable visual languages.

The work is structured in four parts: a theoretical framework on the relationship between energy transition and visual codes, the description of the method for constructing and validating the chromatic model, the presentation of the results of the perceptual survey based on simulated profiles, and the proposal of a new visual classification of hydrogen grounded on CO₂ emission intensity. Due to its interdisciplinary nature, the contribution offers potential relevance within the scientific community by proposing a replicable model of environmental communication that connects technical knowledge and visual culture in the processes of ecological transition.

Energy Transition and visual codes | The energy transition, beyond representing a technological challenge, implies a cultural transformation that demands new languages, symbolic systems, and communicative infrastructures. In this context, visual communication is not only an informative medium but also an epistemic and relational device capable of generating understanding and engagement (Tufte, 2006; Ware, 2004; Valenti et alii, 2024). Colour, in particular, plays a central role as a cognitive and semiotic system (Albers, 1963; Itten, 1961; Bertin, 1983; Kress and van Leeuwen, 2020; Lupton, 2017), enabling perceptual structures and shared meanings. In recent studies, the colour reflection has progressively expanded from the perceptual to the cognitive and communicative domain, defining it as an interpretative device of visual and cultural reality (Gage, 1999; Heller, 2009; Fairchild, 2013; Falcinelli, 2017). These contributions have redefined the role of colour as an element of symbolic construction, capable of integrating aesthetic, psychological, and informational dimensions, offering new tools for the representation of complex processes and for the design of environmental communication.

From this perspective, Visual Design can be understood as a tool for cognitive sustainability, combining accessibility with scientific rigour (Casiddu, Burlando and Chen, 2024; Valenti et alii, 2024; Zannoni et alii, 2024). The ability of colour to build symbolic relationships is now recognised in environmental communication and complex design processes. In the case of hydrogen, the Hydrogen Colour Classification associates hues with specific production processes; although conceived initially for dissemination purposes, it has been adopted in institutional documents and communication strategies (IEA, 2021; Confindustria, 2021; Reitsma, 2023), acquiring a prescriptive value devoid of theoretical grounding.

The literature has highlighted several limitations: perceptual arbitrariness (Kusoglu, 2022), lack of shared standards (Ocenic and Tantau, 2023), difficulty in representing hybrid technologies (Ajanovic, Sayer and Haas, 2022; Noussan et alii, 2021), and limited inclusivity toward emerging solutions (Chew et alii, 2023; Paltsev et alii, 2021). Boretti (2021) proposes to expand the chromatic range, introducing hues such as white for technologies like solar pyrolysis. Alternatively, recent studies suggest that models based on chromatic gradients can express the relationships between energy sources and emission intensities (Arcos and Santos, 2023; Vezzoni, 2024).

In such approaches, colour assumes an interpretative function, becoming a cognitive interface be-

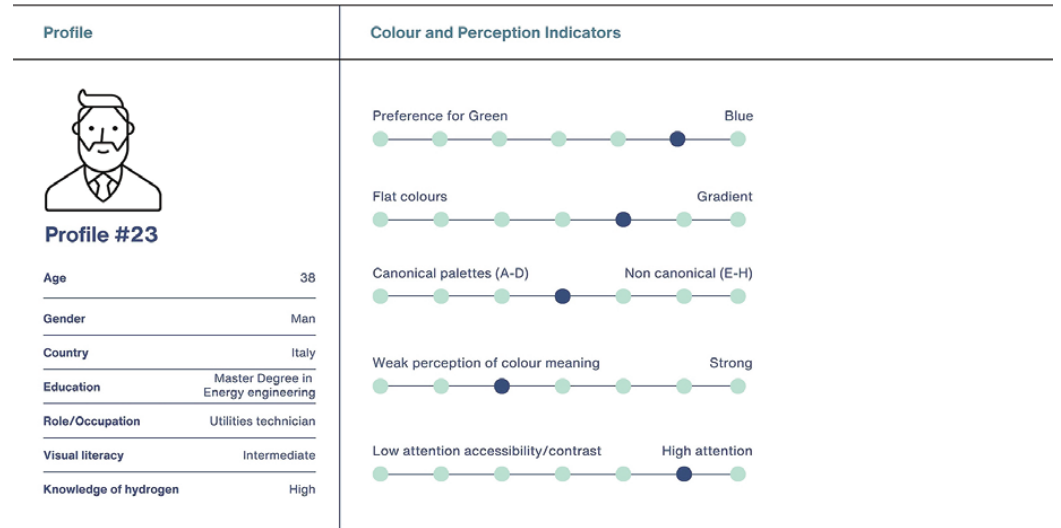
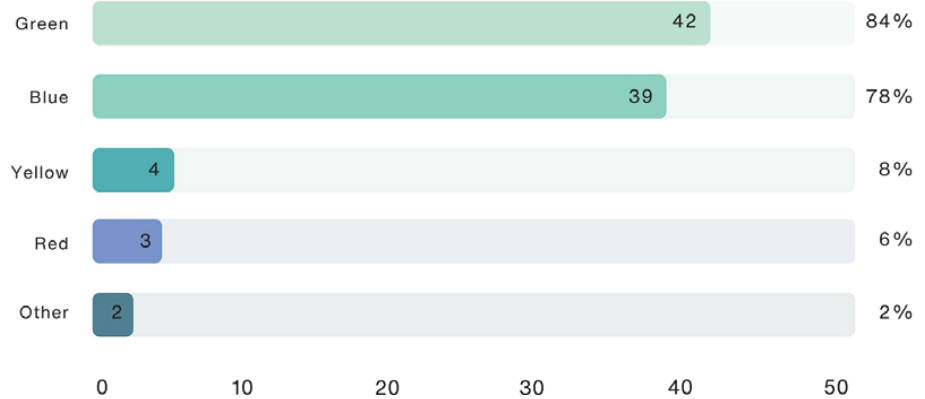
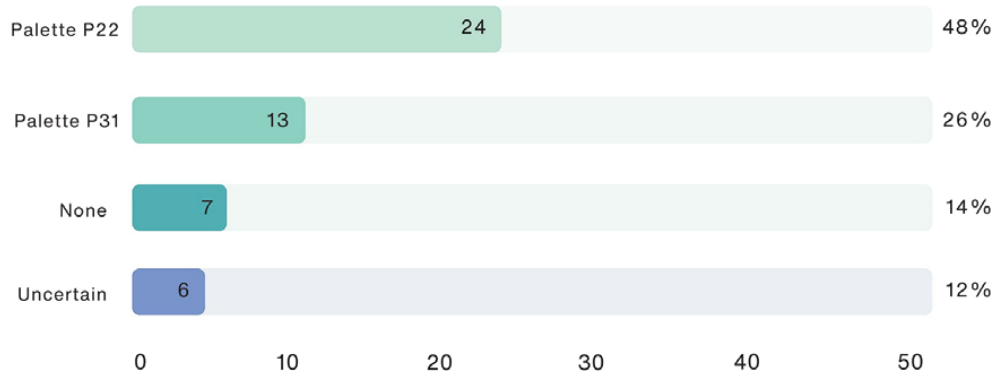


Fig. 9 | Example of profile obtained using Large Language Model systems (credit: M. Meschini, 2025).

What colours do you generally associate with concepts such as sustainability and technological innovation?



Which palette do you think is most consistent with the visual identity of a brand in the hydrogen sector?



Which of the following statements reflects your colour assessment?

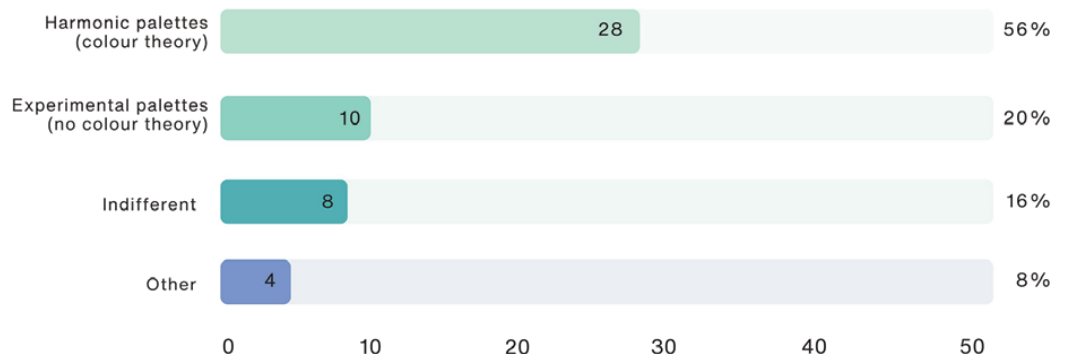


Fig. 10-12 | Some answers to the survey questions (credits: M. Meschini, 2025).

tween complex systems and visual narratives (Bertin, 1983; Kress and van Leeuwen, 2020). The construction of accessible visual languages aligns with the paradigms of sustainability and the circular economy, contributing to the qualitative redefinition of development (Capra and Luisi, 2014; Raworth, 2017; Sachs, 2019; Hickel, 2017): within this framework, environmental communication helps orient behaviours and collective representations (Rawsthorn and Antonelli, 2022; Manzini, 2015).

Within this scenario, the HEHS project serves as a case study in which scientific research and visual communication are integrated into a harmonious chromatic syntax, empirically validated and replicable. The adoption of visual systems based on gradients, accessibility (WCAG, 2025) and perceptual recognisability contributes to the construction of a symbolic ecosystem for transition, as also outlined in European and national policy documents (European Commission, 2021b; European Parliament and Council, 2023; MISE, 2020; MASE, 2023b; Confindustria, 2021).

Construction of the chromatic model | The development of a chromatic system for the visual repre-

sentation of hydrogen was structured according to an integrated methodology that combined the critical analysis of existing visual identities with the theoretical construction of a harmonic repertoire and subsequent perceptual validation (Fig. 1). The initial sample consisted of nineteen international case studies, selected among operators, consortia, public bodies, and companies involved in the production, distribution, and promotion of hydrogen (Figg. 2, 3). The logos and graphic systems associated with each entity were analysed by directly extracting RGB and HSB colour values using vector tools and parametric reading software (Fig. 4).

At the same time, the compliance of colour combinations with the contrast criteria established by WCAG 2.1 was verified to assess the degree of visual accessibility from a communicative perspective. The analysis also included typographic components, compositional structure, and predominant graphic techniques, as well as the semiotic reading of the visual signs employed, with reference to the theory of perception and visual communication (Itten, 1961; Arcos and Santos, 2023).

For the validation phase, the research adopted a controlled semantic simulation methodology, ba-

sed on the use of Large Language Models (LLMs) to generate user profiles. Instead of traditional administration to a real sample, an artificial population of fifty simulated individuals was constructed, modelled according to demographic, cultural, and professional variables. These profiles were calibrated to reproduce the typological variety of a potential user base, maintaining internal consistency among role, education, context, and level of visual literacy. Moreover, the overall approach, from the theoretical phase to perceptual validation, was conceived as a structured experimental method, designed to ensure internal coherence and facilitate reuse in analogous research contexts.

The questionnaires, semi-structured and primarily descriptive, were organised into five main sections (Tab. 1) and administered to the simulated profiles through a controlled iterative interaction, in which the model was guided to respond according to semantic constraints, narrative coherence, and plausible behaviour. This process enabled exploration of diverse response scenarios, representative of different levels of perceptual sensitivity, communicative competence, and symbolic awareness, without the logistical and statistical limitations typical of real-world surveys.

The process generated a rich dataset, with convergent outcomes in terms of chromatic preference, symbolic effectiveness, and perceptual recognisability, which were interpreted in light of the initial hypotheses and theoretical principles adopted. The adoption of an LLM-based simulation was not intended to replace empirical investigation, but rather to act as an exploratory and reflective device, consistent with an ethical approach to communicative design, in which artificial intelligence functions as a cognitive infrastructure capable of supporting the generation of evaluative scenarios, expanding the horizon of design possibilities, and testing the symbolic coherence of visual solutions across differentiated contexts.

Chromatic palettes and outcomes of the perceptual survey | Starting from the systematisation of chromatic data, a repertoire of thirty-one reference palettes was constructed, each composed of three to five colours and organised into eight harmonic groups, labelled A to H (Figg. 5-8). The first four groups (A-D) follow the canons of Itten's theory (monochromatic, analogous, complementary). In contrast, groups E-H derive from configurations recurrent in the visual systems of the energy sector. The palettes were reconstructed in vector format, encoded, and prepared for perceptual verification through controlled semantic simulation.

Perceptual validation was conducted by simulating 50 profiles generated by LLMs calibrated on demographic, educational, and professional variables. The analysis of responses revealed a consistent narrative coherence, allowing not only the identification of general chromatic preferences but

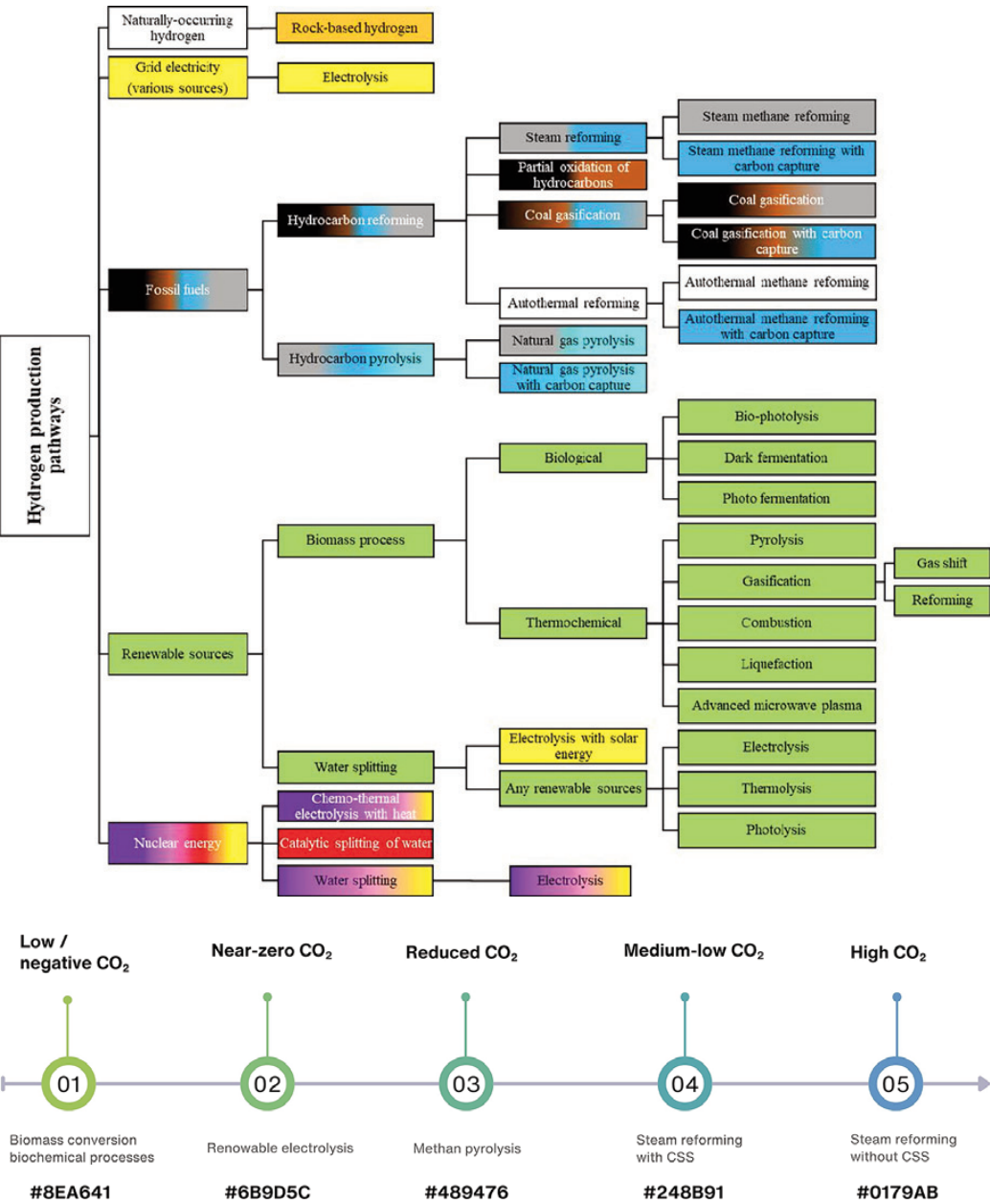
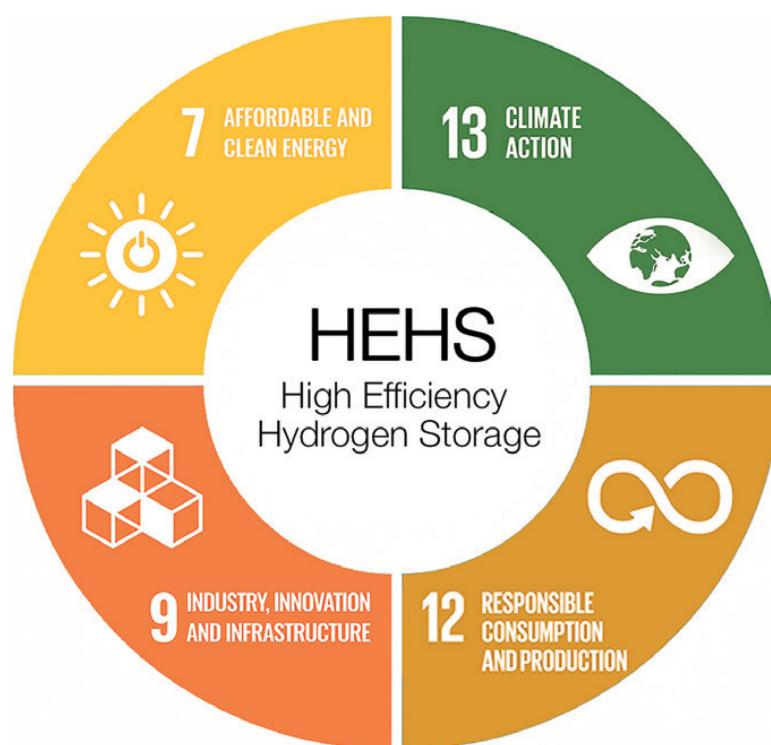


Fig. 13 | Current classification of hydrogen with different colour (source: Oceanic and Tantau, 2023).

Fig. 14 | Proposal for a new classification (credit: M. Meschini, 2025).

Fig. 15 | Correlation map between the HEHS project and the four Sustainable Development Goals of the 2030 Agenda (credit: M. Meschini, 2025).



also the underlying motivations behind the choices (Fig. 9). The analysis highlights an evident symbolic polarisation: green and blue are respectively associated with environmental sustainability and technological innovation (Fig. 10).

This semantic convergence, widespread and transversal across the different profiles, confirms the relevance of these hues as privileged chromatic codes in energy communication. Alongside this evidence, there is a strong preference for palettes constructed according to harmonic relationships derived from colour theory (Fig. 11), perceived as more legible, stable, and appropriate for institutional contexts. Non-canonical configurations, while occasionally recognised as original, were considered less effective in the immediate transmission of meaning. From this emerges a principle of perceptual continuity, in which the theoretical solidity of chromatic composition translates into a higher degree of comprehension and recognisability.

The final validation revealed a clear preference for the 'P22' palette (48%), built on a green-blue gradient consistent with colour theory (Fig. 12), followed by 'P31' (26%), characterised as an experimental palette. The strength of this choice lies not only in its aesthetic appeal but, above all, in its ability to integrate the two central symbolic poles of the energy transition into a single visual continuum: naturalness and technology. The green-blue gradient that characterises it was perceived as a dynamic and evolutionary representation, capable of narrating transformation processes without interruption, in a chromatic balance that combines perceptual coherence, tonal harmony, and functional readability, in accordance with WCAG 2.1 criteria.

The validation conducted through LLM-based models, while offering a high degree of semantic and narrative control, reflects the dimension of a simulated experiment, designed to ensure perceptual coherence under controlled conditions. This approach, although effective in guaranteeing replicability and methodological transparency, must be interpreted within a representational rather than an ex-

periential horizon, and should thus be understood as a cognitive exploration tool. Similarly, the selection of chromatic cases, derived from consolidated theoretical and perceptual criteria, is limited to a circumscribed application domain – visual communication in the energy sector – and may be further extended and verified in future experimental contexts. Finally, the application of the model highlights some transferability barriers, related to differing levels of visual literacy and to the normative and cultural variability of contexts, which represent both a limitation and a potential area for future research development.

Beyond the Hydrogen Colour Classification | The results of the perceptual survey confirm, in an articulated manner, the validity of the theoretical premise underlying the HEHS project: the need to overcome the current chromatic system of hydrogen, rigid and conventional, in favour of a visual language based on perceptual continuity, symbolic coherence, and semantic legibility. As highlighted by several recent studies (Kusoglu, 2022; Ocenic, 2023; Chew et alii, 2023), the Hydrogen Colour Classification presents several critical issues: the absence of a shared standard, overlapping between hues and production processes, theoretical inconsistencies, and limitations in representing hybrid technologies (Fig. 13).

The approach based on fixed labels appears inadequate to reflect the dynamic complexity of the hydrogen value chain and to support the construction of a recognisable and shared visual imagery. Along this line, Boretti (2021) also calls for the inclusion of new technological configurations, currently excluded from official taxonomies, within the chromatic repertoire, reinforcing the urgency of an epistemologically grounded reformulation.

The five selected hues, belonging to the same blue-green analogous axis, can be reinterpreted as segments of a classificatory gradient that can represent the complexity and variability of production processes. The proposed classification organises the chromatisms into a progressive sequence ordered by CO₂ emission intensity, adopting as its main

parameter the degree of sustainability of hydrogen production technologies (Fig. 14).

The first colour of the palette (#8EA641) corresponds to very low or negative CO₂ levels, associated with biochemical processes and biomass conversion; the second colour (#6B9D5C) represents near-zero CO₂ levels, exemplified by electrolysis powered by renewable sources; the third colour (#489476) refers to reduced CO₂ levels, typical of low-carbon hybrid solutions such as methane pyrolysis; the fourth colour (#248B91) corresponds to medium-low CO₂ levels, linked to steam reforming with Carbon Capture and Storage (CCS); finally, the fifth colour (#0179AB) identifies high CO₂ levels, representative of mature technologies still characterised by high emission intensity, such as steam reforming without capture systems. This gradual logic enables overcoming the segmented approach, allowing the visual representation of liminal zones and evolutionary trajectories. Colour thus ceases to be a mere label and becomes a visual syntax: a codifiable, interpretable, and adaptive system capable of combining perceptual coherence, theoretical soundness (Itten, 1961), and communicative potential. The empirical validation confirms its effectiveness, opening the way to the construction of shared visual codes through design processes that integrate science, design, and representation.

Strategic Vision: SDGs and Cross-cutting Impacts | The HEHS project is configured as an integrated device capable of activating multi-level synergies within the framework of the 2030 Agenda for Sustainable Development (UN, 2015), with particular reference to four key goals (Fig. 15). First, SDG 7 (Affordable and Clean Energy) is directly addressed through the development of a high-efficiency hydrogen storage system based on innovative technologies with low environmental impact. The adoption of hydrate clathrates, combined with predictive models and thermodynamic simulations, steers research toward scalable, safe, and sustainable technical solutions.

SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure) is reflected in the project's data-driven matrix, which integrates scientific experimentation, digitalisation, and industrial transferability to promote intelligent and resilient infrastructures. At the same time, the elaboration of a harmonic and perceptually verifiable chromatic code aligns with the principles of SDG 12 (Responsible Consumption and Production), positioning visual communication as a lever for transparency in information, stakeholder accountability, and the dissemination of sustainable practices. Finally, the overall framework aligns with SDG 13 (Climate Action), situating itself within a systemic vision of decarbonisation that recognises the symbolic and narrative dimensions as enabling factors in the transition.

While maintaining overall coherence with the objectives of the 2030 Agenda, the HEHS project also reveals specific balancing points among different goals. The pursuit of energy efficiency (SDG 7) and infrastructural innovation (SDG 9) necessarily requires the use of advanced materials and technologies that may involve higher environmental impacts and production costs during initial development phases. Similarly, the application of a harmonic chromatic code consistent with SDG 12 implies a mediation between scientific rigour and communicative accessibility, aiming to ensure inclusive understanding without reducing informational complexity. These trade-offs, rather than representing limitations, constitute elements of design awareness, reinforcing the project's capacity to operate responsibly and adaptively within the interconnected framework of the 2030 Agenda.

Conclusions | Through the integration of scientific experimentation and communicative design, the HEHS project has generated an operational model in which technical solutions and visual codes converge within a systemic vision of energy transition. The experimental validation of hydrate formation in ternary mixtures of H_2 - CO_2 -light hydrocarbons under porous conditions (Di Giuseppe and Gambelli, 2024) and the efficiency of storage through CO_2 / N_2 hydrates (Gambelli, Rossi and Gigliotti, 2024) confirm the transferability of the HEHS system to real-world application scenarios, ensuring its thermodynamic reliability and environmental sustainability.

In parallel, the construction of a chromatic palette grounded in perceptual criteria, theoretical harmonies (Itten, 1961), and LLM-based validation responds to the urgency of overcoming the communicative limits of the current Hydrogen Colour Classification (Kusoglu, 2022; Chew et alii, 2023). The proposed gradient introduces a continuous and modular chromatic syntax, capable of representing the evolutionary trajectories of the hydrogen supply chain in a relational rather than dichotomous manner. The visual classification thus moves beyond the prescriptive paradigm of fixed colour codes, configuring itself as a dynamic and semantically grounded system.

This articulation enables the integration of technological heterogeneity and cognitive accessibility, offering a replicable framework for environmental communication. The system can be applied to technical labelling, information interfaces, institutional communication, and eco-design projects, promoting a new role for Visual Design within sustainability processes. The centrality of the chromatic dimen-

sion—often relegated to a merely decorative function—emerges here as a factor of meaning and symbolic cohesion within a complex energy context. In this light, the proposal contributes to defining an alternative epistemological perspective, in which graphic representation is not a mere translation of technical content but a form of knowledge that orients perceptions, decisions, and behaviours.

Notes

1) Next Generation EU Funds, Project co-financed under the Public Notice pursuant to Article 1, paragraph 5, letter a, of the Ministerial Decree of 23 December 2021 – Research Projects for Hydrogen within the PNRR-M2C2 Line of Action 3.5; project code RSH2B_000052; CUP F19J2200183 0004; duration 36 months; Scientific Director Prof. F. Cotana.

References

- Aher, M., Arriaga, R. I. and Kalai, A. T. (2023), "Using large language models to simulate multiple humans and replicate human subject studies", in *Proceedings of the 45th Annual Meeting of the Cognitive Science Society, Sydney, Australia, July 26-29, 2023*, pp. 1-43. [Online] Available at: doi.org/10.48550/arXiv.2208.10264 [Accessed 30 September 2025].
- Ajanovic, A., Sayer, M. and Haas, R. (2022), "The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen", in *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, issue 57, pp. 24136-24154. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.094 [Accessed 30 September 2025].
- Albers, J. (1963), *Interaction of Color*, Yale University Press, New Haven.
- Arcos, J. M. M. and Santos, D. M. F. (2023), "Hydrogen Colour Spectrum – Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production", in *Gases*, vol. 3, issue 1, pp. 25-46. [Online] Available at: doi.org/10.3390/gases3010002 [Accessed 30 September 2025].
- Battisti, A. and Calvano, A. (2024), "Hydrogen Valleys – Scenari di transizione energetica e sviluppo locale per città medie | Hydrogen Valleys – Energy transition and local development scenarios for medium-sized cities", in *Agathón | Inter-*

- national Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 48-57. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1532024 [Accessed 30 September 2025].
- Bertin, J. (1983), *Semiology of Graphics – Diagrams, networks, maps*, University of Wisconsin Press, Madison.
- Binz, M. and Schulz, E. (2023), "Using cognitive psychology to understand GPT-3", in *PNAS | Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 120, issue 6, article e2218523120, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1073/pnas.2218523120 [Accessed 30 September 2025].
- Boretta, A. (2021) "White is the color of hydrogen from concentrated solar energy and thermochemical water splitting cycles", in *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, issue 39, pp. 20790-20791. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.178 [Accessed 30 September 2025].
- Capra, F. and Luisi, P. L. (2014), *The Systems View of Life – A Unifying Vision*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Casiddu, N., Burlando, F. and Chen, B. (2024), "Human-decentred design – Verso una (nuova) era della sofferenza | Human-de-centred Design – Towards a (new) era of suffering", *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 242-249. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16212024 [Accessed 30 September 2025].
- Chew, Y. E., Cheng, X. H., Loy, A. C. M., How, B. S. and Andiappan, V. (2023), "Beyond the Colours of Hydrogen – Opportunities for Process Systems Engineering in Hydrogen Economy", in *Process Integration and Optimization for Sustainability*, vol. 7, Springer, Cham, pp. 941-950. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s41660-023-00324-z [Accessed 30 September 2025].
- Confindustria (2021), *Piano d'Azione per l'Idrogeno – Settembre 2020*. [Online] Available at: public.confindustria.it/repository/2025/06/09121127/documenti-piano-dazione-

- per-lidrogeno-PositionPaper_Pianodazioneperlidrogeno_ott2020_Confindustria.pdf [Accessed 30 September 2025].
- Davoodabadi, A., Mahmoudi, A. and Ghasemi, H. (2021), "The potential of hydrogen hydrate as a future hydrogen storage medium", in *iScience*, vol. 24, issue 1, article 101907, pp. 1-35. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.isci.2020.101907 [Accessed 30 September 2025].
- Di Giuseppe, A. and Gambelli, A. M. (2024), "CO₂ Storage in Deep Oceanic Sediments in the form of Hydrates – Energy Evaluation and Advantages Related to the Use of N₂-Containing Mixtures", in *Energies*, vol. 17, issue 16, article 4102, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en17164102 [Accessed 30 September 2025].
- European Commission (2022), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – REPowerEU Plan*, document 52022DC0230, COM/2022/230 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52022DC0230 [Accessed 30 September 2025].
- European Commission (2021a), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Fit for 55 – Delivering the EU's 2030 climate target on the way to climate neutrality*, document 52021DC 0550, COM/2021/550 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52021DC0550 [Accessed 16 September 2025].
- European Commission (2021b), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A Hydrogen Strategy for a Climate-neutral Europe*, document 52020DC0301, COM/2020/301 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/

- ?uri=CELEX%3A52020DC0301 [Accessed 15 March 2024].
- European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019DC0640, 640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN [Accessed 30 September 2025].
- European Parliament and Council (2023), *Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652*, document 32023L2413, PE/36/2023/REV/2. [Online] Available at: data.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj [Accessed 30 September 2025].
- European Parliament and Council (2018), *Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources*, document 32018L2001, PE/48/2018/REV/1. [Online] Available at: data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj [Accessed 30 September 2025].
- Fairchild, M. D. (2013), *Color Appearance Models*, John Wiley & Sons, Chichester.
- Falcinelli, R. (2017), *Cromorama – Come il colore ha cambiato il nostro sguardo*, Einaudi, Torino.
- Gage, J. (1999), *Colour and Meaning – Art, Science and Symbolism*, University of California Press, Berkeley and Los Angeles.
- Gambelli, A. M., Rossi, F. and Gigliotti, G. (2025), “Measure of the Hydrate-Liquid-Gas Phase Boundary Thermodynamic Conditions for Ethane within a Pure Quartz Porous Sand – Differences from the Ideal Equilibrium Associated to the Sediment”, in *Heat Transfer Research*, vol. 56, issue 15, pp. 43-56. [Online] Available at: doi.org/10.1615/HeatTransRes.2025057469 [Accessed 30 September 2025].
- Gambelli, A. M., Rossi, F. and Gigliotti, G. (2024), “Cold Energy Storage via Hydrates Production with Pure CO₂ and CO₂/N₂ (70/30 and 50/50 vol%) Mixtures – Quantification and Comparison between Energy Stored and Energy Spent”, in *Energies*, vol. 17, issue 9, article 2211, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en17092211 [Accessed 30 September 2025].
- Giampaoli, D., Parodi, G., Cipollini, F., Vattakunnel, S., Gambelli, A. M. and Oneto, L. (2025), “Partial Knowledge Predictive Models for Hydrocarbon Storage”, in Pereira, A., Fernandes, F. P., Coelho, J. P., Teixeira, J. P., Lima, J., Pacheco, M. F., Oneto, L. and Lopes, R. P. (eds), *Optimisation, Learning Algorithms and Applications*, Springer, Cham, pp. 67-82. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-032-00140-5_5 [Accessed 30 September 2025].
- Governo Italiano (2023), *Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza – #NextGenerationItalia*. [Online] Available at: mimit.gov.it/images/stories/documenti/PNRR_Aggiornato.pdf [Accessed 30 September 2025].
- Heller, E. (2009), *Psychologie de la couleur – Effets et symboliques*, Pyramyd, Paris.
- Hickel, J. (2017), *The Divide – A Brief Guide to Global Inequality and its Solutions*, Random House, London.
- IEA – International Energy Agency (2021), *Global Hydrogen Review 2021*. [Online] Available at: iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021 [Accessed 30 September 2025].
- IEA – International Energy Agency (2019), *The Future of Hydrogen – Seizing Today's Opportunities*. [Online] Available at: iea.org/reports/the-future-of-hydrogen [Accessed 30 September 2025].
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2023), *Climate Change 2023 – Synthesis Report – Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Online] Available at: doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647 [Accessed 30 September 2025].
- Itten, J. (1961), *The Art of Color – The subjective experience and objective rationale of color*, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Jordan, M. I. and Mitchell, T. M. (2015), “Machine learning – Trends, perspectives, and prospects”, in *Science*, vol. 349, issue 6245, pp. 255-260. [Online] Available at: doi.org/10.1126/science.aaa8415 [Accessed 30 September 2025].
- Kress, G. and van Leeuwen, T. (2020), *Reading Images – The Grammar of Visual Design*, Routledge, London. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781003099857 [Accessed 30 September 2025].
- Kusoglu, A. (2022), “(Re)Defining Clean Hydrogen – From Colors to Emissions”, in *The Electrochemical Society Interface*, vol. 31, issue 47, pp. 47-51. [Online] Available at: doi.org/10.1149/2.F08224IF [Accessed 30 September 2025].
- Luo, X., Rechart, A., Sun, G., Nejad, K. K., Yáñez, F., Yilmaz, B., Lee, K., Cohen, A. O., Borghesani, V., Pashkov, A., Marinazzo, D., Nicholas, J., Salatiello, A., Sucholutsky, I., Minervini, P., Razavi, S., Rocca, R., Yusifov, E., Okalova, T., Gu, N., Feriani, M., Khona, M., Patil, K. R., Lee, P.-S., Mata, R., Myers, N. E., Bizley, J. K., Musslick, S., Bilgin, I. P., Niso, G., Ales, J. M., Gaebler, M., Murty, N. A. R., Loued-Khenissi, L., Behler, A., Hall, C. M., Dafflon, J., Bao, S. D. and Love, B. C. (2025), “Large language models surpass human experts in predicting neuroscience results”, in *Nature Human Behaviour*, vol. 9, pp. 305-315. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41562-024-02046-9 [Accessed 30 September 2025].
- Lupton, E. (2017), *Design Is Storytelling*, Cooper Hewitt, Smithsonian Design Museum, New York.
- Manzini, E. (2015), *Design, When Everybody Designs – An Introduction to Design for Social Innovation*, MIT Press, Cambridge (MA). [Online] Available at: doi.org/10.7551/mitpress/9873.001.0001 [Accessed 30 September 2025].
- Marjeh, R., Sucholutsky, I., van Rijn, P., Jacoby, N., Grifiths, T. L. (2024), “Large language models predict human sensory judgments across six modalities”, in *Scientific Reports*, vol. 14, article 21445, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41598-024-72071-1 [Accessed 30 September 2025].
- MASE – Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica (2023a), *Investimento 3.5 – Ricerca e sviluppo sull'idrogeno*. [Online] Available at: mase.gov.it/portale/investimenti-3-5-ricerca-e-sviluppo-sull-idrogeno [Accessed 30 September 2025].
- MASE – Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica (2023b), *Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima*. [Online] Available at: mase.gov.it/portale/documenti/d/guest/pniec_2023-pdf [Accessed 20 September 2025].
- MISE – Ministero dello Sviluppo Economico (2020), *Strategia Nazionale Idrogeno – Linee Guida Preliminari*. [Online] Available at: mimit.gov.it/images/stories/documenti/Strategia_Nazionale_Idrogeno_Linee_guida_preliminari_nov20.pdf [Accessed 30 September 2025].
- Noussan, M., Raimondi, P. P., Scita, R. and Hafner, M. (2021), “The role of green and blue hydrogen in the energy transition – A technological and geopolitical perspective”, in *Sustainability*, vol. 13, issue 1, article 298, pp. 1-26. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su13010298 [Accessed 30 September 2025].
- Ocenic, E.-L. (2023), “Harmonizing Hydrogen Colour Codes – Need for an Economic Policy Framework for a Global Hydrogen Market”, in *Ovidius University Annals | Economic Sciences Series*, vol. 28, issue 1, pp. 458-465. [Online] Available at: stec.univ-ovidius.ro/html/anale/RO/2023-i1/Section%203/29.pdf [Accessed 30 September 2025].
- Ocenic, E. and Tanțău, A. (2023), “Redefining the Hydrogen ‘Colours’ based on Carbon Dioxide Emissions – A New Evidence-Based Colour Code”, in *Proceedings of the International Conference on Business Excellence*, vol. 17, issue 1, pp. 111-121. [Online] Available at: doi.org/10.2478/picbe-2023-0013 [Accessed 30 September 2025].
- Paltsev, S., Morris, J., Khesghi, H. and Herzog, H. (2021), “Hard-to-abate sectors – The role of industrial Carbon Capture and Storage (CCS) in emission mitigation”, in *Applied Energy*, vol. 300, article 117322, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117322 [Accessed 30 September 2025].
- Raworth, K. (2017), *Doughnut Economics – Seven Ways to Think Like a 21st-Century Economist*, Chelsea Green Publishing, Vermont.
- Rawsthorn, A. and Antonelli, P. (2022), *Design Emergency – Building a Better Future*, Phaidon Press, London and New York.
- Reitsma, A. (2023), *European Hydrogen Valleys – An Energy Security Perspective*, Doctoral Thesis, University of Groningen, Netherlands. [Online] Available at: heavenn.org/wp-content/uploads/2023/07/Master-thesis_AnniekReitsma_European-Hydrogen-Valleys_an-energy-security-perspective_1-gecomprimeerd.pdf [Accessed 30 September 2025].
- Sachs, J. D. (2019), *The Ages of Globalization – Geography, Technology, and Institutions*, Columbia University Press, New York. [Online] Available at: doi.org/10.7312/sach19374 [Accessed 30 September 2025].
- Tufte, E. R. (2006), *Beautiful Evidence*, Graphics Press, Cheshire.
- UN – United Nations (2015), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*. [Online] Available at: sdgs.un.org/2030agenda [Accessed 2 September 2025].
- Valenti, A., Scalisi, F., Sposito, C., Dellamotta, L. and Maserdotti, A. (2024), “Energia, tecnologia emotiva e valore culturale dei dati – Creare consapevolezza nell'utente con lo storytelling | Energy, emotional technology and cultural value of data – Creating user awareness through storytelling”, *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 70-83. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1552024 [Accessed 30 September 2025].
- Veluswamy, H. P., Kumar, R. and Linga, P. (2014), “Hydrogen storage in clathrate hydrates – Current state of the art and future directions”, in *Applied Energy*, vol. 122, pp. 112-132. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.063 [Accessed 30 September 2025].
- Vezzoni, R. (2024), “How clean is the hydrogen economy? – Tracing the connections between hydrogen and fossil fuels”, in *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 50, article 100817, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.eist.2024.100817 [Accessed 30 September 2025].
- Vivanco-Martin, B. and Iranzo, A. (2023), “Analysis of the European Strategy for Hydrogen – A Comprehensive Review”, in *Energies*, vol. 16, issue 9, article 3866, pp. 1-36. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en16093866 [Accessed 30 September 2025].
- W3C – World Wide Web Consortium (2025), *Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1*. [Online] Available at: w3.org/TR/WCAG21/ [Accessed 30 September 2025].
- Ware, C. (2004), *Information Visualisation – Perception for Design*, Morgan Kaufmann, San Francisco (CA).
- Zannoni, M., Succini, L., Rosato, L. and Pasini, V. (2024), “Transitional industrial designer – La responsabilità di progettisti e imprese per una transizione sostenibile | Transitional industrial designer – The responsibility of designers and companies for a sustainable transition”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 332-343. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15282024 [Accessed 30 September 2025].

